

Universidade Federal do Espírito Santo
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BERNARDO ZANDOMENICO DIAS

**PROPOSTA DE SISTEMA CONSTRUTIVO EM
COMPÓSITO TERMOPLÁSTICO PARA ILHAS
OCEÂNICAS**

VITÓRIA

Dezembro de 2015

BERNARDO ZANDOMENICO DIAS

**PROPOSTA DE SISTEMA CONSTRUTIVO EM
COMPÓSITO TERMOPLÁSTICO PARA ILHAS
OCEÂNICAS**

*Proposition of thermoplastic composite construction system to
oceanic islands*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez

VITÓRIA

Dezembro de 2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

D541p Dias, Bernardo Zandomenico, 1990-
Proposta de sistema construtivo em compósito termoplástico para
ilhas oceânicas / Bernardo Zandomenico Dias. – 2015.
163 f. : il.

Orientador: Cristina Engel de Alvarez.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Termoplásticos. 2. Plásticos na construção civil. 3. Vedação
(Tecnologia). 4. Resistência de materiais. 5. Edifícios – Manutenção. 6.
Desempenho. 7. Madeira plástica. I. Alvarez, Cristina Engel de. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

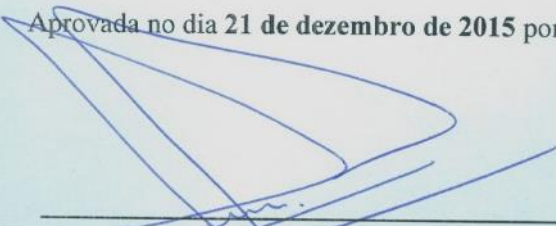
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROPOSTA DE SISTEMA CONSTRUTIVO EM COMPÓSITO
TERMOPLÁSTICO PARA ILHAS OCEÂNICAS**

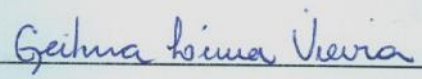
Bernardo Zandomenico Dias

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração em Construção Civil.


Aprovada no dia **21 de dezembro de 2015** por:



Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Orientadora - UFES



Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Interna - UFES



Prof. Dr. Paulo Sérgio de Paula Vargas
Doutor em Comunicação e Semiótica
Examinador Externo - UFES

Vitória – ES, dezembro de 2015

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Cristina Engel de Alvarez, pela orientação desta dissertação, pela cobrança, pelo apoio, por possibilitar que eu visitasse e realizasse trabalhos de campo em algumas ilhas oceânicas brasileiras, vivenciando um pouco dos desafios de se construir em tais locais, e pela grande ajuda na aquisição do compósito termoplástico e no desenvolvimento do sistema construtivo testado;

Ao Professor Doutor Paulo Sérgio de Paula Vargas, por compartilhar seu profundo conhecimento e experiência em projetos e execução de técnicas construtivas, por propor ao longo do trabalho novas formas de desenvolver o sistema construtivo e pelo empréstimo de equipamentos necessários à montagem dos protótipos;

À Professora Doutora Geilma Lima Vieira, Coordenadora do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) da UFES, pela receptividade e por todo o apoio dado com pessoal e equipamentos na condução dos experimentos;

Aos funcionários do LEMAC da UFES, especialmente ao Técnico Antônio Mario Loriato, pelo grande suporte para a realização dos ensaios mecânicos;

Ao Laboratório de Planejamento e Projetos da UFES (LPP-UFES) e sua equipe pela hospitalidade e pelo suporte com infraestrutura e equipamentos utilizados para o progresso da dissertação ao longo de todo o período de mestrado;

Aos Senhores Cristiano Machado Espíndula e Reginaldo Marchiori, funcionários da Carpintaria do Centro Tecnológico, e Senhor Ewaldo Nunes da Silva, funcionário da Carpintaria da Prefeitura Universitária, por auxiliar na preparação dos materiais e componentes necessários aos ensaios mecânicos;

À empresa Madeiras Ecológicas S/A, especialmente ao Gerente de Negócios, Lucas Chequer, por doar todo o compósito termoplástico necessário para a confecção dos protótipos do painel de vedação idealizado;

Aos Professores Doutores Patrício José Moreira Pires e Adenílcia Fernanda Grobério Calenzani por auxiliar na montagem do ensaio de resistência à compressão;

À Marinha do Brasil, à Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM) e às tripulações do Navio-Patrolha Oceânico Araguari e do Navio-Patrolha Macau,

por prover todo o suporte e possibilitar a minha ida e participação nas comissões de manutenção e apoio às estações científicas em ilhas oceânicas;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado cedida e que possibilitou a realização deste trabalho; e

À todas as pessoas e instituições que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A necessidade de manutenções constantes em edificações localizadas em ilhas oceânicas eleva consideravelmente os custos globais da construção, devido ao valor dos próprios materiais utilizados nos processos de manutenção e ao longo trajeto que realizam na etapa de transporte, já que frequentemente vêm do continente. Apesar de geralmente possuir custo de aquisição maior que o da própria madeira – material de uso consagrado em edificações projetadas para as ilhas oceânicas brasileiras –, por ser pré-fabricado e apresentar alta durabilidade e baixa manutenibilidade, mesmo quando expostos às intempéries, os compósitos termoplásticos conhecidos como madeira plástica, sob uma avaliação inicial, são uma alternativa eficiente para esse tipo de edificação. Assim, esta pesquisa teve como objetivo propor um sistema construtivo e focar no desenvolvimento de um painel estrutural de vedação, ambos compostos primordialmente por compósitos termoplásticos conhecidos como madeira plástica, visando sua possível aplicação na construção de estações científicas para ilhas oceânicas. Para o desenvolvimento do sistema construtivo foram realizados, em protótipos do painel de vedação idealizado, ensaios mecânicos de resistência ao impacto de corpo duro, ao impacto de corpo mole e à compressão. Por sua vez, os protótipos foram construídos a partir de projeto específico, incluindo detalhamento. Os procedimentos metodológicos passaram pela revisão de literatura com ênfase para temas relacionados aos compósitos termoplásticos, ilhas oceânicas, estações científicas, normas técnicas e sistemas construtivos. A fim de validar o painel de vedação proposto como adequado às solicitações citadas, os dados dos ensaios mecânicos foram comparados às exigências previstas nas NBR 15575-2 e NBR 15575-4. Os resultados foram suficientes para que o painel se enquadrasse no nível “Intermediário” em relação ao ensaio de resistência ao impacto de corpo duro, mas não alcançasse o nível “Mínimo” no de corpo mole devido ao não cumprimento de apenas um requisito. Quanto à resistência à compressão, o valor admitido de projeto deve ser $5,775\text{N/cm}^2$ ($0,05\text{MPa}$). Por fim, mesmo não alcançando o nível “Mínimo” num dos ensaios, acredita-se que o painel desenvolvido apresenta real possibilidade de utilização em estações científicas em ilhas oceânicas, ou mesmo em edificações térreas em áreas isoladas e sob forte ação das intempéries. Além disso, com a realização de algumas modificações que melhorem o seu desempenho no ensaio de resistência ao impacto de corpo mole, pode-se cogitar a possibilidade de empregá-lo na construção de edificações com dois pavimentos.

Palavras-chave: madeira plástica; vedação estrutural; montagem; comportamento mecânico; resistência; desempenho.

ABSTRACT

The need for constant maintenance by buildings located on oceanic islands considerably increases the overall costs of its construction, due to the economic value of the materials used in the maintenances and to the long transportation distance, since such materials often come from the continent. Although generally more expensive than the wood itself – largely employed material in buildings planned for the Brazilian oceanic islands – because the thermoplastic composites known as plastic lumber are prefabricated, durable and low maintenance, even when exposed to the weather, under an initial evaluation, they are an efficient alternative for buildings designed for oceanic islands. So, this research aims to propose a constructive system, focusing on the development of a load-bearing building panel, both primarily composed of plastic lumber and designed for the research stations located on oceanic islands. In order to propose the constructive system, a hard body impact test, a soft body impact test and a compressive strength test were performed on prototypes of the load-bearing building panel. In turn, the prototypes were constructed based on design plans and detailing. The methods rely on literature review emphasizing issues related to thermoplastic composites, oceanic islands, research stations, technical standards and building systems. In order to validate the proposed building panel as appropriate to resist the tested tensions, the results of mechanical testing were compared to the requirements of the NBR 15575-2 and NBR 15575-4. The results were enough for the panel fit at the "Intermediate" level regarding the hard body impact test, but not enough to reach the "Minimum" level at the soft body impact test due to the non-accomplishment of only one requirement. Concerning the compressive strength, its design strength must be equal to $5,775\text{N/cm}^2$ ($0,05\text{MPa}$). Finally, even not reaching the "Minimum" level at one of the three tests, it is believed that the load-bearing building panel has real possibility of application in research stations on oceanic islands, or even in single-story buildings in isolated areas and under high levels of weathering. Moreover, after improvements to enhance the performance of the panel at the soft body impact test, the possibility of using it to frame two-storied buildings can be considered.

Keywords: plastic lumber; load-bearing building panel; assemblage; mechanical behavior; strength; performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama síntese dos procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa.....	23
Figura 2: Localização das ilhas oceânicas brasileiras e suas distâncias às capitais mais próximas.	30
Figura 3: Ilhas oceânicas brasileiras.....	31
Figura 4: Ondas quebrando a poucos metros da Estação Científica do ASPSP.	32
Figura 5: Parafuso de pilarete de guarda-corpo totalmente corroído devido à névoa salina. Arquipélago de Fernando de Noronha.....	32
Figura 6: À esquerda, aves sobre o telhado da Estação Científica do ASPSP. À direita, telha metálica termoacústica com região totalmente deteriorada pelo guano das aves, podendo se observar a camada de isolamento da telha na cor amarela.	33
Figura 7: À esquerda, desembarque no AFN. À direita, desembarque no ASPSP.	33
Figura 8: Estações científicas com linguagem arquitetônica que faz referência à ideia de casa. As imagens superior esquerda, superior direita, inferior esquerda e inferior direita correspondem, respectivamente, à 1ª e 2ª estação do ASPSP, à 2ª estação do Atol das Rocas e à ECIT.	36
Figura 9: À esquerda: perfis de madeira plástica. À direita: <i>deck</i> e guarda-corpos de madeira plástica. Ambas as imagens são de componentes instalados na Ilha de Fernando de Noronha.	37
Figura 10: Ondulação em <i>deck</i> de madeira plástica causada, provavelmente, pela dilatação térmica e absorção de água das peças.....	40
Figura 11: Gráfico de Ashby apresentando a resistência à tração perpendicular às fibras x densidade para várias madeiras e composições de compósitos termoplásticos.....	43
Figura 12: Gráfico de Ashby apresentando a resistência à compressão perpendicular às fibras x densidade para várias madeiras e composições de compósitos termoplásticos.....	43
Figura 13: Resistência à tração perpendicular às fibras específica de várias madeiras e compósitos termoplásticos. As médias das resistências específicas dos materiais foram calculadas utilizando dados de 44 espécies coníferas, 130 espécies dicotiledôneas, 127 compósitos termoplásticos experimentais de 17 artigos científicos e 11 compósitos termoplásticos comercializados de 9 fabricantes.....	43
Figura 14: Resistência à compressão perpendicular às fibras específica de várias madeiras e compósitos termoplásticos. As médias das resistências específicas dos materiais foram calculadas utilizando dados de 47 espécies coníferas, 75 espécies dicotiledôneas, 17 compósitos termoplásticos experimentais de 2 artigos científicos e 24 compósitos termoplásticos comercializados de 19 fabricantes.	44
Figura 15: Gráfico de Ashby apresentando a resistência à compressão paralela às fibras x densidade para várias madeiras e composições de compósitos termoplásticos.....	45

Figura 16: Resistência à compressão paralela às fibras específica de várias madeiras e compósitos termoplásticos. As médias das resistências específicas dos materiais foram calculadas utilizando dados de 57 espécies coníferas, 188 espécies dicotiledôneas, 17 compósitos termoplásticos experimentais de 2 artigos científicos e 24 compósitos termoplásticos comercializados de 19 fabricantes.....	45
Figura 17: Propriedades específicas dos materiais. Valores referentes às médias dos 10% maiores valores de cada tipo de material. Não foram encontrados dados de resistência ao cisalhamento referentes aos compósitos experimentais. Unidade dos valores: MPa/g/cm ³	46
Figura 18: À esquerda: fibra de sisal. À direita: imagem ampliada de farinha de madeira. ...	48
Figura 19: Construção da Estação Científica da Reserva Biológica do Atol das Rocas.....	49
Figura 20: Transporte das peças de madeira por botes infláveis.....	49
Figura 21: Peças de madeira serrada das vedações com encaixe macho-fêmea.	50
Figura 22: Construção da Estação Científica do ASPSP. É possível visualizar uma peça de madeira de vedação sendo encaixada nas barras de aço por dois integrantes da equipe de montagem do edifício.	51
Figura 23: Detalhe do sistema viga-laje. As várias peças de madeira justapostas são transpassadas pelos vergalhões formando as vedações e o piso da Estação.	51
Figura 24: Modelos 3D mostrando o sistema construtivo pilar e viga com parede dupla. É possível ver o espaço formado entre as duas paredes que pode ser preenchido com material isolante.....	52
Figura 25: Ligação comum entre vigas e pilares (viga x pilar) de madeira.	53
Figura 26: Pilares de madeira formados pela composição de peças de diferentes dimensões.	53
Figura 27: Viga de madeira formada pela composição de peças de diferentes dimensões.....	53
Figura 28: Perfis de madeira plástica comercializados pela empresa Ecowood.	54
Figura 29: Esquema de posicionamento de peças de <i>deck</i> de madeira plástica. Para entabramento com 25mm de espessura, o fabricante recomenda um espaçamento entre as vigas de apoio igual a 300mm.	55
Figura 30: Guarda-corpos e <i>decks</i> construídos em madeira plástica no Arquipélago de Fernando de Noronha.	55
Figura 31: Elementos metálicos de ligação entre as peças de madeira plástica (Arquipélago de Fernando de Noronha).	56
Figura 32: Perfil sólido 120mm x 10mm. Fabricante: Plasticwood.it. Importador e Distribuidor: Madeiras Ecológicas.	60
Figura 33: Perfil alveolar 200mm x 38mm. Fabricante: Plasticwood.it. Importador e Distribuidor: Madeiras Ecológicas.	60
Figura 34: Perfil sólido 140mm x 25mm. Fabricante: Plasticwood.it. Importador e Distribuidor: Madeiras Ecológicas.	61

Figura 35: Perfil sólido 200mm x 21mm. Fabricante: Plasticwood.it. Importador e Distribuidor: Madeiras Ecológicas.	61
Figura 36: Aplicação do sistema na ECASPSP. Os detalhes mostram a conexão entre o piso e a vedação e entre a vedação e a cobertura.	62
Figura 37: Perfis de compósito termoplástico doados pela empresa Madeiras Ecológicas para o desenvolvimento da pesquisa. Dimensões dos perfis: 21mm x 200mm x 2000mm (espessura x largura x comprimento).	63
Figura 38: Vista da seção transversal dos perfis. É possível ver as pequenas saliências existentes nas extremidades dos perfis e os frisos em suas faces.	64
Figura 39: Diferentes tipos de parafusos autoatarraxantes testados. Da esquerda para a direita: 6 x 90; 6 x 69; 5 x 60; 4 x 58; 4,5 x 49; 4 x 49; 4,5 x 39 e 4 x 35 (diâmetro x comprimento, medidas em milímetros).	65
Figura 40: Fissuras e ondulações causadas por parafusos com diâmetro grande em relação à espessura das peças de compósito. Testes feitos sem a execução de furos guias.	66
Figura 41: Perspectiva do modelo final do painel.	68
Figura 42: Vista superior com as dimensões e especificações finais do painel. Cotas em centímetros.	69
Figura 43: Detalhe de corte longitudinal apresentando a base do painel de vedação encaixado na guia do piso. A imagem exemplifica um painel conectado a um piso tabuado.	69
Figura 44: Vista frontal e vista lateral da porção superior do painel de vedação. Cotas em centímetros.	70
Figura 45: Corte transversal do sistema de ligação entre 2 painéis colineares.	71
Figura 46: Perspectiva mostrando a junção entre painéis perpendiculares feita com cantoneira, parafusos, porcas e arruelas metálicas e mata-juntas em compósito termoplástico.	72
Figura 47: Esquema de montagem dos painéis de vedação.	73
Figura 48: Esquema de montagem de uma vedação formada por vários painéis colineares.	74
Figura 49: Esquema de montagem de uma vedação formada por vários painéis perpendiculares entre si.	77
Figura 50: Esquema de montagem de vedações conectadas ao piso.	79
Figura 51: À esquerda, peças de compósito já cortadas transversalmente ao meio e à direita, peça a ser cortada longitudinalmente.	84
Figura 52: Peça de 21mm x 100mm x 2000mm sendo cortada para produzir peças de 21mm x 100mm x 570mm (espessura x largura x comprimento).	85
Figura 53: Diferenças no comprimento das peças de compósito.	86
Figura 54: Peça de compósito de 21mm x 200mm x 1000mm sendo furada com broca 5/16".	87
Figura 55: Porca, contraporca e arruela inferiores posicionadas.	88

Figura 56: Peça de compósito sendo deslizada pelas barras rosqueadas.	88
Figura 57: Parede externa do painel de vedação finalizada.	89
Figura 58: Lateral da parede externa com peças desalinhadas (à esquerda) e diferença de cerca de 7mm no alinhamento entre duas delas (à direita).	90
Figura 59: À esquerda, parede sem curvatura aparente e, à direita, parede com curvatura causada por flambagem devida ao aperto das porcas metálicas.	91
Figura 60: Marcação dos locais de aparafusamento.	92
Figura 61: À esquerda, processo de aparafusamento, e à direita, imagem mostrando o comprimento do parafuso que penetra nos montantes.	92
Figura 62: Conjunto (parede externa parafusada aos montantes) já rotacionado e parede interna prestes a ser posicionada sobre os montantes para aparafusamento.	93
Figura 63: Fresta entre o montante e a extremidade da parede externa.	93
Figura 64: Aplicação do peso do corpo para tentar impedir que as peças da parede se afastassem dos montantes no momento da aparafusamento.	94
Figura 65: Frestas com cerca de 1mm a 2mm ocorridas no aparafusamento.	94
Figura 66: Os três protótipos concluídos.	95
Figura 67: Posicionamento do protótipo no quadro rígido. À direita, detalhe do engaste na base do painel.	98
Figura 68: Esfera de 0,5kg (à esquerda) e de 1,0kg (à direita) utilizadas no ensaio.	98
Figura 69: Paquímetro com resolução de 0,02mm utilizado no ensaio.	99
Figura 70: Esfera de aço de 0,5kg (à esquerda) e de 1,0kg (à direita) alinhadas ao centro do painel.	99
Figura 71: Areia (à esquerda) e serragem (à direita) inseridos no saco de couro.	100
Figura 72: Saco de couro com 40kg de mistura de areia e serragem.	101
Figura 73: Saco de couro alinhado ao centro do painel (à esquerda) e dispositivo para a medição dos deslocamentos horizontais (à direita).	101
Figura 74: Bomba hidráulica utilizada no ensaio de compressão. É possível ver à direita o manômetro que indica a carga aplicada.	103
Figura 75: À esquerda, manômetro da bomba hidráulica; à direita, cilindro hidráulico utilizado.	103
Figura 76: Relógio comparador utilizado. Foram empregados 3 semelhantes.	104
Figura 77: Protótipo e equipamentos posicionados e prontos para o início do ensaio de compressão. As imagens mostram a localização de cada elemento empregado no ensaio.	105
Figura 78: Peça de madeira de Paraju e de compósito termoplástico utilizadas para distribuir a carga aplicada pelo cilindro hidráulico.	106

Figura 79: À esquerda, mocha com 0,18mm de profundidade causada pelo impacto da esfera de 0,5kg abandonada a 0,50m de altura. À direita, mocha com 0,42mm de profundidade causada pelo impacto da esfera de 1,0kg abandonada a 3,00m de altura.	109
Figura 80: Depressão numa peça do painel. A linha vermelha segue a cava natural do perfil da esquerda para a direita, enquanto a linha amarela segue a mesma cava da direita para a esquerda, evidenciando uma mudança em sua direção causada pela depressão.	110
Figura 81: Esfera de 0,5kg abandonada para impacto próximo e sobre os parafusos.....	110
Figura 82: Dois parafusos distintos deformados com os impactos das esferas de aço. À esquerda, parafuso com a cabeça amassada no lado esquerdo; à direita, parafuso com a cabeça entortada para o lado direito.	111
Figura 83: Desalinhamento das peças dos montantes, desprendimento dos parafusos e destacamento das peças de compósito na junção entre os montantes. Fotos capturadas após o impacto da altura de 0,30m.	114
Figura 84: Parafusos das peças superiores rompidos para as alturas de 0,60m e 0,90m.	114
Figura 85: Ruína do protótipo ocorrida para a altura de abandono de 1,20m.....	115
Figura 86: Registro dos deslocamentos sofridos pelo CP 1. Alguns dos impactos foram descartados. É possível ver ainda a marcação na folha milimetrada dos pontos de deslocamento horizontal instantâneo (D_h) e residual (D_{hr}) do painel para cada altura de abandono.	116
Figura 87: A imagem superior mostra a vista superior da chapa e a distância de 6cm entre os furos. A imagem inferior mostra a espessura da chapa (3,18mm).	119
Figura 88: Painel após a fixação das chapas de aço ligando os montantes. As imagens mostram a lateral esquerda do painel. O mesmo procedimento foi feito na lateral direita.	120
Figura 89: Porca afrouxada com o último impacto ($h = 1,80m$). Protótipo CP 2.	124
Figura 90: Pequeno desalinhamento das peças do montante direito (considerando a face na qual o saco de couro impacta como frente) do CP 3 após o impacto de 0,90m. À esquerda, montante antes do impacto. À direita, montante após o impacto.	125
Figura 91: Peça central da parede externa rompida com o impacto ($h = 1,20m$). Protótipo CP 3.	126
Figura 92: Peça abaixo da peça central da parede externa rompida com o impacto ($h = 1,80m$). Protótipo CP 3.	126
Figura 93: CP 3 após impactos de 0,90m (à esquerda) e 1,80m (à direita).....	127
Figura 94: CP 3 após os impactos de 1,20m (à esquerda) e 1,80m (à direita). Não houve desestabilização ou ruína do protótipo.	128
Figura 95: Gráfico Carga x Deslocamento (vertical) dos 3 protótipos testados. A linha tracejada preta indica, a grosso modo, o limite entre as fases elástica e plástica.	131
Figura 96: Gráfico Carga x Deslocamento (horizontal) dos 3 protótipos testados. A linha tracejada preta indica, a grosso modo, o limite entre as fases elástica e plástica.	132

Figura 97: Deslocamento sofrido pelo CP 1 com o ensaio de resistência à compressão. À esquerda, montante lateral esquerdo. À direita, montante lateral direito.	134
Figura 98: Montante esquerdo (acima e à esquerda), montante direito (acima e à direita) e parede traseira (abaixo) do CP 1 rompidos no ensaio de resistência à compressão. Percebe-se que as peças de uma face do painel tendem a se aproximar (compressão), enquanto as da face oposta tendem a se afastar (tração).....	135
Figura 99: Ruptura da última peça da parede externa do CP 2 no ensaio de resistência à compressão.	136
Figura 100: Peça superior da parede externa arrancada no ensaio de resistência à compressão. À direita, quina rompida.	137
Figura 101: CP 3 após o ensaio de resistência à compressão.	138
Figura 102: Montantes rompidos na mesma altura das peças centrais da parede externa. ...	139
Figura 103: Montantes rompidos no local de engaste do painel.	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Equipamentos necessários para os ensaios mecânicos.	27
Quadro 2: Ensaios mecânicos realizados na pesquisa e respectiva quantidade necessária de corpos de prova.....	28
Quadro 3: Referências utilizadas no levantamento.....	42
Quadro 4: Quantitativo de materiais para a produção de um painel de vedação.	81
Quadro 5: Quantitativo de materiais para a junção entre dois painéis de vedação colineares.	81
Quadro 6: Quantitativo de materiais para a junção entre dois painéis de vedação perpendiculares.....	81
Quadro 7: Massa total de um painel de vedação e seus componentes.....	82
Quadro 8: Exigências e informações das normas brasileiras referentes ao ensaio de resistência ao impacto de corpo duro.	100
Quadro 9: Exigências e informações das normas brasileiras referentes ao ensaio de resistência ao impacto de corpo mole.....	102
Quadro 10: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro no protótipo CP 1.	108
Quadro 11: Critérios e níveis de desempenho definidos pela NBR 15575-4 para ensaios de resistência ao impacto de corpo mole.....	111
Quadro 12: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole no protótipo CP 1.	112
Quadro 13: Critérios e níveis de desempenho definidos pela NBR 15575-4 para ensaios de resistência ao impacto de corpo mole.....	117
Quadro 14: Deslocamentos horizontais sofridos pelo protótipo CP 1 em relação aos máximos admitidos em norma.	118
Quadro 15: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro no protótipo CP 2.	121
Quadro 16: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro no protótipo CP 3.	121
Quadro 17: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole no protótipo CP 2.	122
Quadro 18: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole no protótipo CP 3.	123
Quadro 19: Deslocamentos horizontais do CP 1 (não modificado) e do CP 2 e CP 3 (modificados).....	124
Quadro 20: Exigências da NBR 15575-4 x resultados observados.	129

Quadro 21: Deslocamentos horizontais sofridos pelos protótipos CP 2 e CP 3 em relação aos máximos admitidos em norma.....	130
Quadro 22: Cargas e tensões aplicadas e deslocamentos verticais e horizontais sofridos pelos 3 protótipos no ensaio de resistência à compressão.	132
Quadro 23: Tensões calculadas x Tensões registradas x Deslocamentos horizontais.	144
Quadro 24: Massa/m ² vedado e volume/m ² vedado das vedações do sistema viga-laje em madeira e das vedações do sistema viga-laje duplo em compósito termoplástico.	146

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Hipótese.....	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>19</i>
1.3	Limitações da pesquisa	19
1.4	Variáveis envolvidas.....	20
1.5	Contextualização e Justificativa.....	20
2	METODOLOGIA	22
2.1	Revisão bibliográfica – Etapa 1.....	24
2.2	Detalhamento do sistema construtivo – Etapa 2.....	24
2.3	Confecção de protótipos do painel e ensaios mecânicos – Etapa 3	25
2.3.1	<i>Análise do processo de confecção dos protótipos.....</i>	<i>25</i>
2.3.2	<i>Análises e ensaios mecânicos laboratoriais.....</i>	<i>26</i>
2.4	Análise dos resultados e indicação de melhorias no painel – Etapa 4	28
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
3.1	Ilhas oceânicas	30
3.2	Estações científicas	33
3.3	Compósitos termoplásticos: madeira plástica	36
3.3.1	<i>Conceito de compósito termoplástico</i>	<i>37</i>
3.3.2	<i>A madeira plástica: características gerais</i>	<i>38</i>
3.3.3	<i>Resistência aos esforços mecânicos.....</i>	<i>41</i>
3.4	Sistemas construtivos.....	48
3.4.1	<i>Sistemas construtivos em outros materiais</i>	<i>48</i>
3.4.2	<i>Sistemas construtivos em madeira plástica.....</i>	<i>54</i>
3.5	Normas técnicas.....	56
3.5.1	<i>Normas técnicas nacionais.....</i>	<i>56</i>
3.5.2	<i>Normas técnicas internacionais.....</i>	<i>57</i>
4	DESENVOLVIMENTO E DETALHAMENTO DO SISTEMA CONSTRUTIVO	59
4.1	Desenvolvimento do sistema construtivo.....	59
4.1.1	<i>Painéis estruturais de vedação esboçados e avaliados.....</i>	<i>64</i>
4.1.2	<i>Escolha do parafuso autoatarraxante.....</i>	<i>65</i>
4.2	Projeto final do painel.....	67
4.2.1	<i>Etapas de montagem</i>	<i>72</i>
4.2.2	<i>Quantitativo de materiais para a produção de um ou mais painéis de vedação</i>	<i>80</i>
4.2.3	<i>Massa do painel de vedação</i>	<i>82</i>

5	MONTAGEM DOS PAINÉIS DE VEDAÇÃO DO SISTEMA CONSTRUTIVO	84
5.1	Preparo das peças de compósito termoplástico	84
5.1.1	<i>Corte.....</i>	84
5.1.2	<i>Furação.....</i>	86
5.2	Montagem dos protótipos	87
5.2.1	<i>Encaixe das peças das paredes externa e interna.....</i>	87
5.2.2	<i>Aparafusamento das peças das paredes externa e interna nos montantes</i>	91
5.2.3	<i>Comentários sobre a montagem.....</i>	94
6	PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	97
6.1	Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro.....	98
6.2	Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole.....	100
6.3	Ensaio de resistência à compressão	102
7	RESULTADOS DOS ENSAIOS, ANÁLISE E EXIGÊNCIAS DAS NORMAS.....	108
7.1	Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: CP 1.....	108
7.2	Análise do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: CP 1	111
7.3	Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: CP 1	112
7.4	Análise do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: CP 1	117
7.5	Modificações do painel.....	119
7.6	Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: CP 2 e CP 3 (modificados).....	120
7.7	Análise do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: CP 2 e CP 3 (modificados)...	122
7.8	Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: CP 2 e CP 3 (modificados).....	122
7.9	Análise do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: CP 2 e CP 3 (modificados)...	129
7.10	Ensaio de resistência à compressão: CP 1, CP 2 e CP 3 (modificados)	130
7.11	Análise do ensaio de resistência à compressão: CP 1, CP 2 e CP 3 (modificados)	140
7.11.1	<i>Estado-limite último</i>	140
7.11.2	<i>Estado-limite de serviço.....</i>	141
7.11.3	<i>Comentários sobre as resistências à compressão calculadas.....</i>	142
8	DISCUSSÃO E PROPOSTA DE MELHORIAS NO PAINEL	145
8.1	Preparação das peças e montagem dos painéis de vedação.....	145
8.2	Massa/m² vedado e volume/m² vedado	145
8.3	Desempenho nos ensaios mecânicos.....	147
8.3.1	<i>Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro</i>	147
8.3.2	<i>Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole</i>	147
8.3.3	<i>Ensaio de resistência à compressão.....</i>	148
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	150
10	REFERÊNCIAS	151
	APÊNDICE A	159

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de manutenções constantes em edificações localizadas em ilhas oceânicas, situadas a centenas de quilômetros da costa brasileira, – como o Atol das Rocas, a Ilha de Trindade, o Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) e o Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) – eleva consideravelmente os custos globais da construção, seja pelo valor dos próprios materiais e da mão de obra utilizados nos processos de manutenção, seja pelo custo do transporte que acontece por navios ou aviões vindos do continente (ALVAREZ, 2003). Além disso, vários desses locais abrigam rica fauna e flora e são áreas de proteção ambiental, o que condiciona decisivamente a forma de intervenção humana, exigindo cuidados com os resíduos gerados na construção, uso e manutenção dos edifícios e na transformação da paisagem, por exemplo (ALVAREZ, 2003). Tais fatos deixam claro o motivo da preocupação de se construir nessas áreas edificações que sejam duráveis e de baixa necessidade de manutenção. Entretanto, o ambiente e as condições climáticas de ilhas oceânicas colocam à prova os materiais de construção utilizados nos edifícios em função das altas temperaturas e umidade; elevada incidência solar associado ao pouco sombreamento; e interferência de animais, ventos e névoa salina constantes. No ASPSP ainda são rotineiras a ocorrência de abalos sísmicos e a incidência de ondas nos elementos construídos. Já no Atol das Rocas o que acontece é a movimentação natural do terreno, formado por material granular, e que faz necessária a adoção de sistemas construtivos desmontáveis para a Estação Científica do local (WOELFFEL, 2011).

Assim, custos iniciais mais elevados para um sistema¹ construtivo a ser utilizado em edifícios projetados para ilhas oceânicas, mas que atenda aos requisitos de baixa manutenção e elevada durabilidade podem ser considerados aceitáveis, uma vez que os gastos com manutenções constantes ao longo dos anos, além de necessitar de planejamento e emprego de mão de obra, podem elevar consideravelmente o valor global da construção ao longo de sua vida útil. Por outro lado, os materiais e técnicas construtivas de emprego mais eficiente são aqueles que facilitam o transporte (desde o embarque no continente até a área de construção na ilha oceânica) permitindo, por exemplo, o deslocamento de peças utilizando-se apenas a força do homem ou equipamentos manuais simples, como carrinhos de mão e talhas, uma vez que algumas dessas ilhas apresentam solo acidentado e não possuem píeres ou caminhos

¹ De acordo com a NBR 15575-1, o sistema é “a maior parte funcional do edifício. Conjunto de elementos e componentes destinados a cumprir com uma macrofunção que a define (exemplo: fundação, estrutura, vedações verticais, instalações hidrossanitárias, cobertura)” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013c).

pavimentados (ALVAREZ, 2003). Para isso os elementos devem possuir dimensões, volumetria e massa adequadas, o que pode ser conseguido por meio do processo de pré-fabricação, na qual as três características citadas (dimensões, volumetria e massa) podem ser definidas de antemão. Outro aspecto obtido com o uso de elementos pré-fabricados tão relevante quanto o citado é o relacionado aos impactos ambientais de uma obra arquitetônica: os componentes pré-fabricados são produzidos com as dimensões especificadas em projeto, diminuindo consideravelmente as falhas na fase de construção e com isso a geração de resíduos (WOELFFEL, 2011). Além disso, podem ser pré-montados no continente, isto é, montados anteriormente à sua montagem final na ilha oceânica, possibilitando a visualização prévia de erros e incompatibilidades entre componentes (WOELFFEL; ALVAREZ, 2010), o que também reduz a quantidade de resíduos gerados na obra e o tempo de permanência na ilha para a sua execução.

Desse modo, apesar de geralmente possuir custo de aquisição maior que a própria madeira – material de uso consagrado em edificações projetadas para ilhas oceânicas –, por serem componentes pré-fabricados e apresentarem alta durabilidade e baixa necessidade de manutenção, mesmo quando expostos às intempéries (KLYOSOV, 2007), os compósitos termoplásticos conhecidos como madeira plástica, sob uma avaliação inicial, são uma alternativa para construções projetadas para ilhas oceânicas.

Esse tipo de compósito é fabricado a partir do plástico, sendo frequentemente inseridos em sua formulação materiais de origem vegetal e mineral, além de aditivos. Nos últimos anos tem sido muito utilizado na execução de bancos, *decks*, pisos internos, cercas, mesas, esquadrias (NAJAFI; HAMIDINA; TAJVIDI, 2006; NAJAFI et al., 2007), por exemplo.

1.1 Hipótese

A hipótese desta pesquisa é que perfis de compósitos termoplásticos (madeira plástica) podem ser utilizados conjuntamente a elementos de conexão e fixação e formar um painel estrutural de vedação para edificações térreas em ilhas oceânicas capaz de cumprir as exigências das NBR 15575-2 e NBR 15575-4 referentes à resistência à compressão, à resistência ao impacto de corpo mole e à resistência ao impacto de corpo duro, isto é, à segurança estrutural.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa teve como objetivo principal propor um sistema construtivo e focar no desenvolvimento de um painel estrutural de vedação, ambos compostos primordialmente por compósitos termoplásticos conhecidos como madeira plástica, visando sua possível aplicação na construção de estações científicas em ilhas oceânicas.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Identificar os sistemas de construção existentes que possuem potencial para emprego da madeira plástica ou que podem sofrer adaptações para se adequarem às características desse material, à tipologia arquitetônica das estações científicas e aos aspectos climáticos e ambientais das ilhas oceânicas;
- Desenvolver o detalhamento do painel de vedação em compósito termoplástico;
- Quantificar experimentalmente, utilizando protótipos produzidos a partir do detalhamento do painel de vedação, sua resistência à compressão, ao impacto de corpo duro e ao impacto de corpo mole;
- Comparar os resultados dos ensaios mecânicos realizados com o exigido pelas NBR 15575-2 e NBR 15575-4, a fim de buscar a validação do painel proposto no que tange a segurança estrutural; e
- Indicar possíveis adaptações ou melhorias na concepção inicial do painel.

1.3 Limitações da pesquisa

Esta pesquisa aborda apenas aspectos do painel estrutural de vedação relacionados a sua resistência à compressão, ao impacto de corpo duro e ao impacto de corpo mole. Deve ser enfatizado que não foram realizados todos testes mecânicos necessários previstos nas NBR 15575-2 e NBR 15575-4 para a efetiva aprovação do sistema no que tange ao comportamento estrutural. Como exemplo de ensaios mecânicos não realizados estão os de resistência às ações transmitidas por portas, de resistência a cargas provenientes de peças suspensas, de resistência às cargas de ocupação incidentes em guarda-corpos e parapeitos de janelas e de resistência às cargas laterais, que visa simular as ações horizontais devidas ao vento.

1.4 Variáveis envolvidas

A confirmação da hipótese depende do resultado dos ensaios mecânicos laboratoriais realizados com os protótipos do painel do sistema construtivo. Enquanto que os resultados dos ensaios dependem das características dos protótipos e de seus componentes especificados em projeto. Destas características as principais são:

- Comportamento mecânico da madeira plástica que, por sua vez, dependerá de sua composição, isto é, tipos e quantidade de plásticos, cargas vegetais, cargas minerais e aditivos utilizados em sua fabricação (KLYOSOV, 2007; BUTYLINA; HYVÄRINEN; KÄRKI, 2012);
- Dimensões dos perfis de madeira plástica (comprimento, altura e espessura);
- Forma de fixação dos perfis (pregos, parafusos, cantoneiras ou encaixes);
- Composição dos componentes de fixação;
- Quantidade de pontos de fixação dos perfis; e
- Dimensões finais do painel estrutural de vedação proposto (comprimento, altura e espessura).

1.5 Contextualização e Justificativa

O projeto de estações científicas para ilhas oceânicas vem da necessidade de edificações de apoio para os pesquisadores (biólogos, oceanógrafos, arquitetos, físicos, geógrafos, geólogos, entre outros) e, eventualmente, militares que realizam trabalhos na região. Assim, precisa-se tanto de ambientes de permanência prolongada – como quartos e cozinha –, como aqueles inerentes à própria pesquisa, como pequenos laboratórios, estações de trabalho e áreas para secagem e armazenagem de equipamentos utilizados nas atividades de campo.

Por sua vez, o custo de manutenção é um fator decisivo para construções em ilhas oceânicas, já que as edificações estão expostas às intempéries de modo mais intenso que em áreas urbanas, rurais e até costeiras e também por se situarem a centenas de quilômetros das cidades (ALVAREZ, 2003). Assim, a rápida degradação de alguns materiais, a dificuldade de se obter elementos para reparos ou substituição de peças e a necessidade de transporte por navio ou avião dos produtos adquiridos no continente fazem o custo financeiro dos processos de manutenção ao longo da vida útil da edificação possuir grande relevância, devendo ser somado ao custo inicial da construção (ALVAREZ, 2003). Com isso, surge como uma das principais

preocupações para edificações projetadas para tais locais, o emprego de materiais que apresentem melhor desempenho às suas características climáticas e ambientais, isto é, com maior durabilidade e menor necessidade de manutenção (ALVAREZ; MELO; MELLO, 2000).

Outro fator de extrema relevância para o contexto de ilhas oceânicas é a facilidade de transporte dos materiais de construção, ou seja, suas dimensões, seu peso, volume e formato, tendo em vista que normalmente não existem equipamentos mecânicos para isso (como guindastes e caminhões) – sendo utilizado como meio de transporte o próprio homem – e que a trajetória até o canteiro de obras pode incluir a passagem por terrenos acidentados e arenosos (ALVAREZ, 2003). Além disso, pode haver deslocamento dos materiais por botes e embarque e desembarque nos navios por pequenos portos e píeres. Com isso, elementos construtivos leves (que podem ser transportados por uma ou duas pessoas), de pequeno volume (que podem ser manobrados nos navios e botes e manuseados com pouca dificuldade) e com formato que facilita o transporte e evita acidentes (sem a presença de arestas pontiagudas e que possibilitem firmeza em seu manejo) são imprescindíveis (ALVAREZ, 2003). Almeja-se que o sistema construtivo proposto possa ser utilizado em várias ilhas oceânicas e, eventualmente, em outras áreas isoladas. Para isso, ele foi idealizado tendo em vista as piores situações existentes em tais locais, como restrições de transporte, mão de obra não especializada e dificuldades de manutenção.

Por outro lado, nos locais considerados como possíveis beneficiados com a técnica construtiva proposta, há também o viés ambiental. Por geralmente serem uma APA (Área de Proteção Ambiental), as ilhas oceânicas requerem o uso de materiais e sistemas construtivos que provoquem o menor desperdício e minimizem a quantidade de ajustes envolvidas na obra, visando a não deposição de resíduos no local e a redução dos custos de seu envio para o continente (ALVAREZ, 2003).

Diante do exposto, escolheu-se os compósitos termoplásticos conhecidos como madeira plástica para emprego na construção de uma estação científica, uma vez que tal material, segundo revisão bibliográfica realizada, cumpre os requisitos explicitados, permitindo a construção com o ajuste de suas dimensões antes do envio ao canteiro de obras, possuindo baixa necessidade de manutenção e elevada durabilidade quando exposta às intempéries (KLYOSOV, 2007). Contudo, a madeira plástica ainda não é usada como vedação ou sistema estrutural de edificações, o que torna necessária a proposição de uma técnica construtiva voltada às suas características.

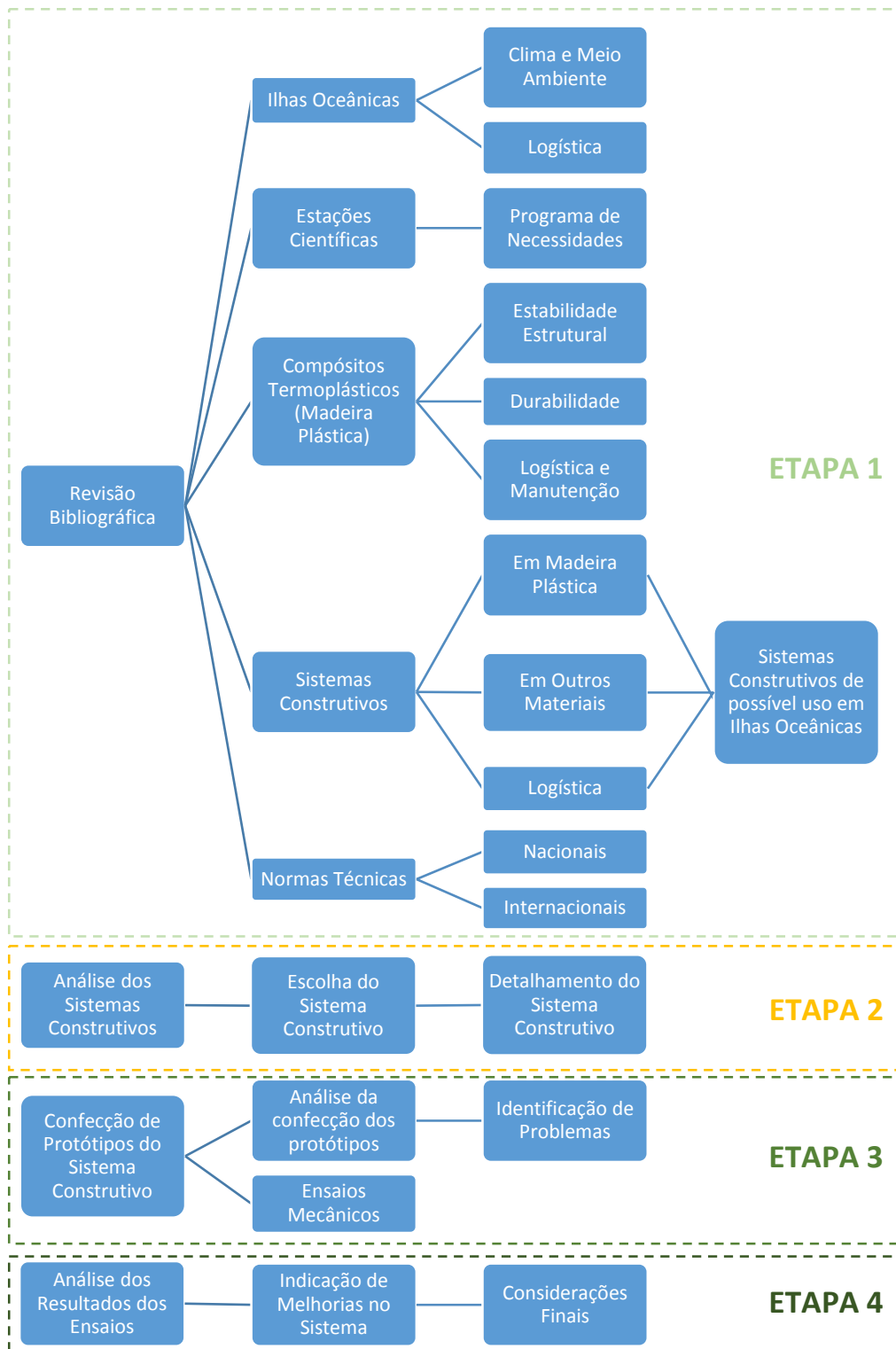
2 METODOLOGIA

Este capítulo explicita os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento deste trabalho, apresentando estratégias de pesquisa e métodos utilizados para alcançar o objetivo geral e os objetivos específicos.

Para a proposição de um sistema construtivo em madeira plástica para as estações científicas em ilhas oceânicas foram previstos e realizados ensaios mecânicos em protótipos do painel estrutural de vedação idealizado. Todas as atividades foram embasadas por revisão de literatura a respeito dos vários temas que englobam a pesquisa e por conhecimento de campo adquirido em duas expedições aos Arquipélagos de Fernando de Noronha e de São Pedro e São Paulo.

Os procedimentos metodológicos descritos ao longo deste item (Metodologia) são resumidos e apresentados em forma de diagrama na Figura 1 a fim de facilitar o entendimento.

Figura 1: Diagrama síntese dos procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa.



2.1 Revisão bibliográfica – Etapa 1

Primeiramente foi realizada uma extensa revisão de bibliografia a respeito dos seguintes temas principais: ilhas oceânicas, estações científicas, compósitos termoplásticos – mais especificamente madeira plástica –, sistemas construtivos e normas técnicas. Foram pesquisados projetos de arquitetura das estações científicas existentes em ilhas oceânicas brasileiras, relatórios de construção e manutenção de tais edificações, artigos científicos, dissertações, teses, *websites* de fabricantes de madeira plástica, sistemas construtivos que empregam madeira plástica e outros materiais, além dos sistemas já empregados em ilhas oceânicas, e normas técnicas nacionais e internacionais que tratam de compósitos termoplásticos e de sistemas estruturais e de vedação.

Para a pesquisa dos artigos científicos e normas técnicas internacionais utilizou-se as bases de dados Scielo, Scopus, *Web of Science* e ASTM (*American Society for Testing and Materials International*). Já os projetos de arquitetura das estações científicas existentes em ilhas oceânicas e seus relatórios de construção e manutenção foram obtidos no acervo do Laboratório de Planejamento e Projetos da UFES (LPP-UFES).

Também foram feitas duas visitas aos Arquipélagos de Fernando de Noronha e de São Pedro e São Paulo, ocorridas em março e agosto de 2014, acrescentando ao conhecimento teórico a experiência prática dos acontecimentos e atividades em ilhas oceânicas. No Arquipélago de Fernando de Noronha foi possível participar de operações de embarque e desembarque por bote no porto local. Já no Arquipélago de São Pedro e São Paulo também se vivenciou operações de embarque e desembarque no píer existente e as dificuldades causadas nessa atividade por objetos de grandes dimensões ou peso. Presenciou-se a atividade das ondas, das intempéries, dos animais e de tremores que, somados, causam grande deterioração de alguns materiais e componentes construtivos da Estação Científica. Além disso, foram vivenciados os processos de manutenção preventiva e corretiva para a conservação e recuperação do edifício.

2.2 Detalhamento do sistema construtivo – Etapa 2

Foram analisados os sistemas construtivos pesquisados que são compatíveis com as características da madeira plástica, com a tipologia arquitetônica das estações científicas e com as peculiaridades das ilhas oceânicas. Com isso, realizou-se a escolha do sistema mais adequado ao contexto de tais edifícios. Por fim, baseado nos projetos das estações, foi feito o detalhamento do sistema construtivo escolhido, a partir do qual posteriormente foram

confeccionados os protótipos do painel de vedação visando a realização dos ensaios mecânicos laboratoriais.

A escolha e o detalhamento do sistema incluíram a definição dos materiais (especificação da madeira plástica, dos parafusos, das porcas e de outros elementos projetados), de suas dimensões, da quantidade necessária de cada componente e dos procedimentos de montagem e fixação, tendo como base os itens pesquisados na revisão bibliográfica como durabilidade dos elementos, facilidade de manutenção, estanqueidade e logística necessária.

2.3 Confeção de protótipos do painel e ensaios mecânicos – Etapa 3

Definidos o detalhamento da unidade principal do sistema construtivo – o painel de vedação – e os procedimentos de montagem e fixação, foram confeccionados os protótipos dos painéis para a realização de ensaios mecânicos laboratoriais a fim de testar o que foi projetado e, assim, avaliar seu comportamento estrutural e exequibilidade.

Os ensaios mecânicos foram realizados baseados nas NBR 15575-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a) e NBR 15575-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b), que tratam do desempenho de sistemas estruturais e de sistemas de vedações verticais internas e externas, respectivamente, e são utilizados pelo Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de produtos inovadores (SINAT) do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) para a avaliação de sistemas construtivos pouco conhecidos ou que ainda não foram testados. Os ensaios propostos nas normas citadas também envolvem outras NBRs (apresentadas nos próximos itens), cujos procedimentos foram seguidos para a validação do sistema.

2.3.1 Análise do processo de confecção dos protótipos

A fim de aperfeiçoar o painel de vedação e adequá-lo à realidade na qual será utilizado, durante o processo de confecção dos protótipos foram observados todos os obstáculos encontrados, tais como dificuldade no encaixe dos componentes, na execução de furos e cortes na madeira plástica, incompatibilidade entre peças, quebras e deformação excessiva dos elementos, quantidade de tempo e necessidade de equipamentos especiais para o desenvolvimento das atividades, entre outros. Além disso, as soluções adotadas na montagem para sanar algum problema foram registradas e todo o processo foi fotografado visando a criação de um banco de dados que poderá ser consultado para o aperfeiçoamento dos protótipos e para eventuais estudos futuros.

2.3.2 *Análises e ensaios mecânicos laboratoriais*

Seguem descritas as análises mecânicas às quais os protótipos do painel proposto foram submetidos para validação.

- Estabilidade e resistência (estado-limite último): de acordo com a NBR 15575-2, o sistema estrutural deve apresentar um nível específico de segurança contra a ruína, considerando-se as combinações de carregamento de maior probabilidade de ocorrência. Para verificar se o sistema atende ou não ao item deve ser realizada uma análise do projeto dos componentes estruturais da edificação com base nas normas técnicas existentes. Na inexistência de Norma Brasileira de projeto estrutural específica para o tipo de estrutura analisado (caso deste trabalho), pode ser aceita a demonstração da estabilidade e da segurança estrutural através de cálculos, modelos e ensaios. Quando da execução dos ensaios, estes deverão ser compatíveis às situações às quais os elementos estruturais estarão submetidos na prática. Para elementos que sofrerão compressão o ensaio a ser realizado é o de resistência à compressão, que deverá ser destrutivo e contar com teste de pelo menos três protótipos: o sistema estrutural deve resistir às cargas verticais sobre seu topo simulando excentricidade accidental em relação à espessura das peças que serão submetidas aos esforços, além de eventual excentricidade prevista em projeto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a). Para painéis pré-fabricados estruturais a altura dos protótipos a serem testados deve ser igual a altura prevista em projeto para o pé-direito da edificação na qual serão empregados, sua largura para o ensaio deve ser de, no mínimo, 1,20m (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b).
- Deformações ou estado de fissuração (estado-limite de serviço): o ensaio a ser realizado neste caso é o mesmo do item anterior (estabilidade e resistência). Desse modo, os resultados obtidos nele também podem ser utilizados para determinar a resistência às deformações de serviço, exigida neste item. Ressalta-se que as deformações de serviço são aquelas relacionadas aos deslocamentos e fissuras, por exemplo, que causam insegurança nos usuários ou atrapalham o funcionamento de instalações e equipamentos, como portas e janelas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).
- Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: o sistema de vedações verticais internas e externas (fachadas), com ou sem função estrutural, deve resistir aos impactos de corpo

mole, que simulam choques acidentais gerados pela própria utilização da edificação ou choques provocados por tentativas de intrusões intencionais ou não. A NBR 15575-4 faz exigências específicas nesse item para casas térreas, colocando que sob a ação de impactos de corpo mole o sistema de vedações não deve sofrer ruptura ou instabilidade, fissuras, escamações, danos aos componentes ou instalações acopladas às vedações, ou qualquer outro tipo de falha que possa comprometer o uso da edificação. O ensaio deve ser realizado de acordo com a NBR 15575-2, NBR 15575-4 e NBR 11675 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b).

- Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: o sistema de vedações verticais internas e externas (fachadas) deve resistir aos impactos de corpo duro (uma esfera de aço), não sofrendo ruptura, traspassamento, fissuras, escamações ou outro tipo de dano, porém são toleradas moissas localizadas. São realizados 10 impactos para cada altura de abandono da esfera especificada em norma, sendo os 10 pontos de impacto do protótipo aleatórios e distintos, ou seja, não são feitos sucessivos abandonos do corpo duro sobre o mesmo ponto do protótipo testado. O ensaio deve ser realizado de acordo com a NBR 15575-2, NBR 15575-4 e seus anexos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b).

Os ensaios mecânicos foram feitos com os equipamentos do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) e do Laboratório de Estruturas (LEST) da Universidade Federal do Espírito Santo. Ressalta-se que anteriormente à execução sistemática dos ensaios foram realizados testes pilotos visando a mensurar o tempo necessário para a realização de cada ensaio – e assim ter informações para um planejamento mais preciso da execução de todos eles – e detectar possíveis atividades ou instrumentos necessários para um eficiente prosseguimento dos testes laboratoriais e que não foram previstos na etapa inicial do planejamento. O Quadro 1 mostra os equipamentos primários necessários a cada tipo de ensaio feito exigidos pelas normas técnicas brasileiras.

Quadro 1: Equipamentos necessários para os ensaios mecânicos.

Ensaio	Equipamentos de laboratório necessários
Resistência à compressão	Prensa hidráulica
	Instrumento de medição de deslocamentos com precisão de 0,01mm
Resistência ao impacto de corpo mole	Corpo percussor de impacto: corpo mole com massa de 40kg e forma conforme NBR 11675
	Defletômetros com precisão de 0,1mm
	Estrutura de apoio rígida

Ensaio	Equipamentos de laboratório necessários
Resistência ao impacto de corpo duro	Corpo percussor de impacto: corpo duro de grandes dimensões (esfera de aço com 1,0kg) e corpo duro de pequenas dimensões (esfera de aço com 0,50kg)
	Paquímetros com resolução de 0,1mm
	Equipamentos para realização de abandono pendular das esferas de aço

A NBR 15575-2 e a NBR 15575-4 definem para o ensaio mecânico de resistência à compressão um número mínimo de 3 protótipos do sistema proposto. Também exigem, quando não se conhece o comportamento do sistema estrutural, que nos ensaios de resistência à compressão excêntrica os corpos de prova sejam submetidos a no mínimo 10 carregamentos diferentes e que os ensaios sejam destrutivos. Já para ser testado sob os outros tipos de esforços (resistência ao impacto de corpo mole e resistência ao impacto de corpo duro), as NBR 15575-2 e NBR 15575-4 não estabelecem claramente um número mínimo de protótipos, o que deixa subentendido ser apenas 1. Porém, para que o desempenho característico do painel de vedação não fosse baseado apenas no resultado de 1 protótipo, decidiu-se realizar estes ensaios também com 3 protótipos, sendo estes utilizados posteriormente para o ensaio de resistência à compressão.

Assim, para a realização dos ensaios mecânicos citados foi necessária a quantidade de corpos de prova (protótipos) descritas no Quadro 2:

Quadro 2: Ensaio mecânicos realizados na pesquisa e respectiva quantidade necessária de corpos de prova.

Ensaio mecânico	Nº mínimo de corpos de prova (protótipos) exigidos por norma	Nº de corpos de prova (protótipos) submetidos ao ensaio
Resistência ao impacto de corpo mole	1	3*
Resistência ao impacto de corpo duro		
Resistência à compressão	3	3

* Foram utilizados os mesmos 3 protótipos para a realização dos 3 ensaios previstos.

Desse modo, foram utilizados um total de 3 protótipos na realização dos ensaios mecânicos.

2.4 Análise dos resultados e indicação de melhorias no painel – Etapa 4

Com a realização dos ensaios mecânicos foram comparados os resultados de resistência obtidos com os exigidos pelas NBR 15575-2 e NBR 15575-4 e seus anexos. Em tais normas é descrito como calcular, a partir dos ensaios mecânicos, a resistência à compressão a ser considerada em projeto, tanto para o estado-limite último, como para o estado-limite de serviço. Assim, com os dados dos ensaios são definidos valores de resistência típicos do painel proposto que podem ser utilizados em projetos futuros sem a necessidade de novos ensaios. Neste caso, a NBR 15575-

2 prevê a validação do sistema se este for apto a suportar as cargas previstas no projeto da edificação, como peso próprio do telhado e cargas acidentais (estado-limite último), e se for capaz de não se deformar excessivamente, a ponto de causar desconforto psicológico nas pessoas ou mal funcionamento de partes do edifício (estado-limite de serviço).

As normas citadas ainda apresentam tabelas com critérios e níveis de desempenho relativos aos ensaios de resistência ao impacto de corpo mole e resistência ao impacto de corpo duro, relacionando falhas de possível ocorrência, como fissuras, desagregação de material superficial e mossas, com um respectivo nível de desempenho do sistema construtivo, sendo eles “Mínimo”, “Intermediário” ou “Superior”. Com isso, para validação do sistema pelas NBR 15575-2 e NBR 15575-4, os resultados dos ensaios devem, ao menos, se enquadrar no desempenho “Mínimo”.

Em seguida, a partir dos problemas encontrados na etapa de confecção dos protótipos (Etapa 3) e do desempenho desses nos ensaios, foram indicadas melhorias no projeto e na montagem do painel estrutural de vedação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa a apresentar uma revisão bibliográfica a respeito dos temas principais que necessitam de domínio para que se alcance o objetivo deste trabalho. Além de propiciar o domínio de determinado assunto e guiar o pesquisador nas tomadas de decisões, a revisão bibliográfica expõe as áreas do conhecimento que não estão desenvolvidas ou para as quais ainda não há consenso entre os pesquisadores e que, por isso, devem ser melhor investigadas.

3.1 Ilhas oceânicas

Ilhas oceânicas são ilhas situadas em oceano profundo e que no Brasil são compostas por: Atol das Rocas, Arquipélago de Fernando de Noronha, Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Ilha da Trindade e Arquipélago de Martim Vaz (MOHR et al., 2009), conforme Figura 2.

Figura 2: Localização das ilhas oceânicas brasileiras e suas distâncias às capitais mais próximas.



Fonte: Almeida (2006, p. 4).

São áreas distantes da costa brasileira em centenas de quilômetros e que também por isso requerem cuidados adicionais no momento do planejamento e construção de edifícios em seu território (ALVAREZ, 2003). Além do longo trajeto a ser percorrido para se chegar nelas, são distantes de centros urbanos e de locais de fabricação e venda de materiais e componentes de construção (Figura 3). Possuem fauna e flora frágeis, podendo as intervenções e atividades nesses locais resultar em impactos ambientais significativos (ALVAREZ, 2003). Algumas das

ilhas citadas são classificadas como Unidades de Conservação, UCs, (MOHR et al., 2009), e atualmente possuem planos de manejo com zonas que regem o que, como e onde pode ser realizado.

Figura 3: Ilhas oceânicas brasileiras.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

Suas características climáticas são agressivas, principalmente para componentes e materiais de construção que permanecem em áreas externas ou em fachadas de edificações, apresentando elevadas temperaturas e umidade do ar (Figura 4); alta incidência solar, principalmente para as ilhas localizadas próximas à linha do Equador; exposição permanente à névoa salina (maresia); e interferência de animais, como caranguejos e aves (Figura 5). Esta última amplamente detectada no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Figura 6), no qual o guano da grande quantidade de aves que sobrevoam e pousam sobre o telhado da estação científica local somado à ação das intempéries, tornou quebradiça ou deteriorou totalmente várias áreas das telhas metálicas que compõem a cobertura da edificação (DIAS; CRUZ; ALVAREZ, 2014). Com isso, a camada de isolamento da telha ficou desprotegida, o que facilita a passagem de água da chuva e pode estar contribuindo para o surgimento de goteiras no interior da edificação, observando-se que as superfícies das telhas metálicas que as aves não conseguiam acesso estavam em boas condições (DIAS; CRUZ; ALVAREZ, 2014).

Figura 4: Ondas quebrando a poucos metros da Estação Científica do ASPSP.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

Figura 5: Parafuso de pilarete de guarda-corpo totalmente corroído devido à névoa salina. Arquipélago de Fernando de Noronha.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

Figura 6: À esquerda, aves sobre o telhado da Estação Científica do ASPSP. À direita, telha metálica termoacústica com região totalmente deteriorada pelo guano das aves, podendo se observar a camada de isolamento da telha na cor amarela.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

Além disso, excetuando a Ilha de Fernando de Noronha, situada no Arquipélago de mesmo nome, na qual existe um pequeno porto protegido por quebra-mar para a atracação das embarcações, o embarque e desembarque de pessoas e materiais nas ilhas geralmente é difícil, existindo a forte interferência de ondas, rochas situadas no mar e ventos (Figura 7). Com todos esses obstáculos, não é rara a queda de pessoas ou materiais no mar (ALVAREZ, 2003).

Figura 7: À esquerda, desembarque no AFN. À direita, desembarque no ASPSP.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

3.2 Estações científicas

As estações científicas em ilhas oceânicas são edificações projetados para dar apoio às atividades de pesquisa e abrigo aos profissionais oriundos de todo o Brasil e, eventualmente, do exterior.

De modo geral as estações científicas construídas em ilhas oceânicas brasileiras possuem programa de necessidades semelhantes, havendo diferenças entre elas apenas na quantidade de determinados ambientes e no acréscimo ou eliminação de algum outro espaço. A ocupação normal de cada uma varia de acordo com a capacidade de suporte do ambiente (ALVAREZ, 2003), mas são projetadas para atender confortavelmente de 4 a 6 pessoas que, de modo geral, permanecem no local por duas ou quatro semanas, sendo então substituídos pelo grupo seguinte, em um esquema de rodízio. Entretanto, em períodos de manutenção preventiva e corretiva das estações esse número pode aumentar consideravelmente, uma vez que chegam equipes ligadas à Marinha do Brasil ou ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) para a realização de reparos e conservação do edifício. Em algumas situações, a equipe de manutenção pode necessitar permanecer por muitos dias, chegando a dobrar ou até mesmo quadruplicar a população da estação.

Tanto no Atol das Rocas, como no Arquipélago de São Pedro e São Paulo já foram construídas 2 estações. Já na Ilha de Trindade foi edificada somente uma, no entanto, nesse caso já existiam no local instalações militares que eventualmente serviam de base de apoio aos cientistas antes da construção da Estação. As estações científicas mais recentes foram construídas com dimensões e número de ambientes superiores às construídas inicialmente em tais locais, entretanto, todas possuem ou possuíam apenas o pavimento térreo. Alguns dos ambientes existentes nas últimas estações construídas são os seguintes: cozinha, dormitório, banheiro (com exceção da Estação do Atol das Rocas), varanda, laboratório, depósito e casa de baterias (quando previsto o sistema fotovoltaico). Outros ambientes foram construídos em algumas delas – o que dependeu da solicitação dos usuários e das condições específicas de cada ilha – como por exemplo, sala de estar/jantar, área de serviço, divisão entre os laboratórios (laboratório seco e laboratório úmido) e outras áreas técnicas como casa de gerador (ALVAREZ, 2003).

As estações científicas citadas foram projetadas sob os princípios da sustentabilidade, tendo sido adotadas soluções nesse sentido especialmente para os aspectos relacionados ao conforto, à estrutura e ao sistema elétrico, considerando não somente a etapa de construção, mas a de uso/operação e posterior demolição (ALVAREZ, 2003; WOELFFEL; ALVAREZ, 2010). Como exemplo de soluções empregadas em quase todas as estações já construídas pode-se citar o emprego de estratégias bioclimáticas; de estruturas, vedações e cobertura desmontáveis e reaproveitáveis (o que possibilita a retirada parcial ou total da construção gerando o mínimo de resíduos); o abastecimento de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas; e o uso de

dessalinizador de água, quando necessário. Ressalta-se que o próprio local onde são construídas requer cuidado acentuado com o ambiente em geral, especialmente com a fauna, a flora e a paisagem. É inadmissível para esses locais a má gestão de resíduos, água e energia (ALVAREZ, 2003), visto que tal ocorrência pode gerar, como consequência imediata, impactos ao ambiente e o desabastecimento de água da edificação.

Das 5 estações científicas já construídas em ilhas oceânicas, 4 foram executadas utilizando a madeira como material de construção principal, mais especificamente a madeira serrada. Além disso, também foram construídas em madeira serrada estruturas de sinalização e edificações de apoio a turistas em Fernando de Noronha. Somente a Estação Científica da Ilha da Trindade (ECIT) foi executada utilizando outros materiais: o PVC e o concreto. A motivação principal para o uso dessa técnica foi o desejo de redução dos investimentos de manutenção da edificação – considerando que a madeira necessita de constantes repinturas – e no aumento da durabilidade dos componentes do edifício, como esquadrias e vedações, em locais de alta umidade e insolação (DIAS et al., 2014).

Um ponto em comum entre todas as estações científicas em ilhas oceânicas é sua tipologia e forma: todas elas foram projetadas com linguagem arquitetônica que faz referência a ideia comum de casa (ALVAREZ, 2003), ou seja, construção com proporções próximas às dimensões humanas, presença de amplas varandas e mobiliário de descanso como bancos e áreas para fixação de redes de dormir (Figura 8). As estações foram assim pensadas para propiciar conforto psicológico e acolhimento aos seus usuários, que permanecem por algumas semanas no local. O sentimento de incômodo por estar em local isolado e fisicamente limitado e pequeno já é natural (ALVAREZ, 2003), podendo o desconforto ser acentuado pela permanência em edificações com linguagem e forma estranha ao usuário.

Um importante fator ligado a esses edifícios é a durabilidade e manutenibilidade de seus componentes e materiais de construção. Por serem construções gerenciadas por instituições públicas, sua conservação fica sujeita à disponibilidade de verba pública e ao nível de prioridade dada a elas por tais órgãos (ALVAREZ, 2003). Além dos ambientes agressivos nos quais estão inseridas, a mudança constante das pessoas que as utilizam, incluindo a chegada daquelas que nunca estiveram em uma estação científica em local inóspito e não estão familiarizadas ao modo de uso da edificação e seus equipamentos, contribui para o desgaste de alguns componentes (ALVAREZ, 2003), como esquadrias, e também faz necessário o emprego de sistemas construtivos que exijam processos de manutenção de fácil execução, podendo ser feitos em pouco tempo e por usuários inexperientes.

Figura 8: Estações científicas com linguagem arquitetônica que faz referência à ideia de casa. As imagens superior esquerda, superior direita, inferior esquerda e inferior direita correspondem, respectivamente, à 1ª e 2ª estação do ASPSP, à 2ª estação do Atol das Rocas e à ECIT.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

Nesse sentido, as estações citadas construídas em madeira serrada, apesar de serem pré-fabricadas, admitirem pré-montagem e apresentarem resíduos de construção que não causam grandes danos quando em contato com o ambiente (podendo também ser reciclados), possuem peças que frequentemente sofrem variação dimensional causada por absorção de umidade e mudanças de temperatura, ocasionando fissuras na madeira, frestas e emperramento de esquadrias. Além disso, para conservar a madeira e auxiliar no combate a tais manifestações patológicas as peças devem sofrer pintura anual, no mínimo (WOELFFEL, 2011).

3.3 Compósitos termoplásticos: madeira plástica

A madeira plástica surgiu como uma alternativa à própria madeira em várias de suas funções, sendo geralmente confeccionada em peças de dimensões semelhantes às desta (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012). Nesse sentido, ela é produzida para que também se assemelhe esteticamente à madeira (AZWA et al., 2013), como mostra a Figura 9, sendo muito utilizada na execução de bancos, *deck*, pisos internos, cercas, mesas, esquadrias

(NAJAFI; HAMIDINA; TAJVIDI, 2006; NAJAFI et al., 2007), corrimãos e guarda-corpos (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010).

A madeira plástica é descrita por alguns autores como de maior durabilidade e menor manutenibilidade que a madeira quando exposta às intempéries (GARCÍA et al., 2009; AZWA et al., 2013) – o que é uma das características que estimula o seu uso e o principal atrativo para emprego em técnica construtiva para uma estação científica. Entretanto, seu custo inicial ainda permanece maior que o custo da madeira, o que afasta muitos possíveis compradores, mesmo possuindo custo de manutenção baixo e, assim, ficando mais barata que a madeira – em relação aos custos totais – logo nos primeiros anos após sua aquisição (CALKINS, 2009).

Figura 9: À esquerda: perfis de madeira plástica. À direita: *deck* e guarda-corpos de madeira plástica. Ambas as imagens são de componentes instalados na Ilha de Fernando de Noronha.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

3.3.1 Conceito de compósito termoplástico

De acordo com a ASTM D833 (2012) um compósito é um produto sólido composto por materiais em duas ou mais fases, dos quais um é o material ligante, ou matriz. Desse modo, elementos feitos inteiramente de um material, isto é, sem uma segunda fase, não são nomeados compósitos. Por sua vez, compósitos termoplásticos são aqueles que possuem como matriz polímeros termoplásticos, ou seja, polímeros que podem ser repetidamente amolecidos pelo aumento de temperatura e endurecidos pela diminuição, mantendo semelhantes suas características físicas e mecânicas. No entanto, em alguns casos, tais polímeros podem sofrer degradação e, com isso, modificação em algumas de suas propriedades, depois de submetidos a um ou mais ciclos de aquecimento e resfriamento (RODOLFO JR.; NUNES; ORMANJI, 2006).

O termo “madeira plástica” é a tradução do termo americano “*plastic lumber*” e que originalmente diz respeito a produtos feitos unicamente de um ou mais tipos de plástico. Contudo, os termos “madeira plástica” e “compósito” várias vezes são utilizados comercialmente e também em artigos científicos internacionais para designar tanto os elementos feitos exclusivamente de plástico, como os que possuem outros materiais em sua composição, como cargas (componentes) vegetais e minerais. A própria ASTM define o termo “*plastic lumber*” como sendo um produto feito principalmente de plástico (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), e não exclusivamente dele. Assim, neste trabalho o termo “madeira plástica” também será utilizado do mesmo modo, ou seja, para fazer referência aos dois tipos de materiais.

3.3.2 A madeira plástica: características gerais

De modo geral, os compósitos termoplásticos são fabricados a partir de plástico, cargas vegetais, cargas minerais e aditivos, que melhoram a interação entre a matriz polimérica e as cargas adicionadas, auxiliam no processo de fabricação ou dão cor aos produtos (pigmentos), por exemplo (KLYOSOV, 2007). A matriz polimérica (plástico), as cargas vegetais e as cargas minerais podem ser compostas de materiais virgens ou de resíduos provenientes de lixo doméstico ou de rejeitos industriais.

Conforme Klyosov (2007), nos Estados Unidos, na produção de compósitos termoplásticos com madeira, ou *Wood-Plastic Composites* (WPCs), são amplamente empregados, a fim de substituir parte da matriz polimérica virgem, resíduos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), de Polipropileno (PP) e de Poli(Cloreto de Vinila) (PVC). No entanto, por poder ser fabricada a partir de vários tipos de plásticos, a madeira plástica pode apresentar características e desempenho variáveis (ADHIKARY; PANG; STAIGER, 2008a).

Geralmente, resinas poliméricas produzidas a partir de resíduos plásticos, provenientes do lixo urbano, custam menos que resinas virgens, sendo a redução do custo final destes um dos principais atrativos para o uso de resíduos plásticos (ADHIKARY; PANG; STAIGER, 2008a).

Por outro lado, quando se utiliza vários tipos de plásticos (PP, PEAD, PEBD, entre outros) na fabricação de uma mesma peça de madeira plástica, sua reciclagem torna-se trabalhosa devido às diferentes características físicas dos polímeros (NAJAFI, 2013). Além disso, a separação de diferentes plásticos que formam um mesmo compósito é custosa e algumas vezes impossível de ser realizada (CORROLLER; FAVIS, 2012).

Quanto à sua manutenção, de modo geral necessita apenas de limpeza com água e sabão neutro (ECO-TECH PLASTICS, 2006a; CALKINS, 2009; GREEN BAY DECKING, 2009a). Não precisa ser lixada, envernizada ou receber acabamentos (ECO-TECH PLASTICS, 2006a; GREEN BAY DECKING, 2009a), uma vez que é fabricada pigmentada, reduzindo assim os custos com manutenção. Porém, aceita pinturas, colas e ceras. Pode ser parafusada e manuseada com equipamentos similares aos utilizados na madeira serrada (CARROLL et al., 2001; CALKINS, 2009; EKOPLUS, 2014). Além disso, as peças de madeira plástica podem sofrer retração com o passar do tempo causada por seu processo de fabricação e por variações térmicas (KLYOSOV, 2007). Desse modo, frestas e empenamentos das peças não são raros (Figura 10), assim como ocorre com as construções tradicionais em madeira. Destaca-se, no entanto, a pouca quantidade de edificações construídas com esse material que permitam afirmações definitivas sobre as manutenções ao longo do tempo.

Por sua vez, cargas vegetais são empregadas em larga escala em compósitos termoplásticos principalmente para substituir parte da matriz polimérica, variando algumas características do compósito para melhor, enquanto outras para pior, e barateando o produto final (ADHIKARY; PANG; STAIGER, 2008b; ASHORI; SHESHMANI, 2010; ALMAADEED et al., 2012; CHAVOOSHI et al., 2014). Segundo Klyosov (2007), as cargas vegetais mais empregadas nos WPCs fabricados no Estados Unidos são: farinha de madeira, serragem e casca de arroz, sendo que estas cargas são tipicamente resíduos da indústria madeireira e da agroindústria.

Mesmo quando são utilizadas cargas vegetais em sua composição, a madeira plástica se mostra praticamente imune à ação de cupins (CARROLL et al., 2001; KLYOSOV, 2007), já que grande parte de tais cargas permanecem envoltas pela matriz polimérica (KLYOSOV, 2007). Em casos mais graves, os cupins danificam somente as cargas vegetais presentes na superfície das peças de madeira plástica. Além disso, formulações que contêm antioxidantes e minerais criam uma barreira natural contra a degradação microbiana (KLYOSOV, 2007).

Figura 10: Ondulação em deck de madeira plástica causada, provavelmente, pela dilatação térmica e absorção de água das peças.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

Quanto à absorção de água, quando o produto é feito exclusivamente de plástico, essa fica próxima de 0% da massa do componente, isto é, praticamente não há absorção (KLYOSOV, 2007; ADHIKARY; PANG; STAIGER, 2008a, 2008b; CHEVALI; DEAN; JANOWSKI, 2010). Entretanto, quando ocorre a inserção e o aumento da quantidade de cargas vegetais em sua composição, a absorção de água pelo compósito se eleva várias vezes, podendo chegar, por exemplo, a mais de 5% (CHOW; XING; LI, 2007), 10% (ROWELL; LANGE; JACOBSON, 2002), 15% (CHAVOOSHI et al., 2014), 25% (NAJAFI; KORDKHEILI, 2011), ou mesmo próximo de 40% da massa inicial do componente (BENTHIEN; THOEMEN, 2012), dependendo da formulação do compósito e do tempo de exposição à água. A água é absorvida pelos compósitos por meio de seus poros e canais, e por capilaridade, podendo causar nas peças consequências como: variação dimensional, que pode resultar em ondulações do elemento e pressão sobre componentes adjacentes (KLYOSOV, 2007) – como mostra a Figura 10 –, redução da resistência mecânica (STARK; MATUANA, 2006; STRÖMBERG; KARLSSON, 2009; MORRELL et al., 2010; NAJAFI; KORDKHEILI, 2011); e proliferação de micro-organismos sobre o material (STRÖMBERG; KARLSSON, 2009; HEMMATI; GARMABI, 2012; NAUMANN; STEPHAN; NOLL, 2012; AZWA et al., 2013). Todavia, quando são

utilizados aditivos, como os agentes acopladores, que aumentam a interação entre a superfície da matriz plástica e das cargas vegetais, a absorção de água é reduzida de forma substancial (BLEDZKI et al., 2005; STARK; MATUANA, 2006; ASHORI; NOURBAKHS, 2009; BLEDZKI; LETMAN-SAKIEWICZ; MURR, 2010; HONG et al., 2014).

Há também cargas vegetais que possuem o papel de melhorar consideravelmente algumas características mecânicas do compósito, chamadas cargas reforçadoras (LEI et al., 2007; KIM et al., 2008; AZWA et al., 2013). Entre elas estão as fibras de cânhamo, juta, sisal e algodão. Estas cargas muitas vezes são resíduos de processos industriais, mas, devido à pouca quantidade existente ou ao elevado custo, ainda não são empregadas em larga escala (KLYOSOV, 2007).

No item a seguir é feita a comparação de algumas propriedades mecânicas dos compósitos termoplásticos em relação à madeira, uma vez que este é um dos principais materiais que se pretende substituir na construção de estações científicas.

3.3.3 Resistência aos esforços mecânicos

Foi realizado um levantamento com dados de densidade e de resistência mecânica (módulo de elasticidade, resistência à flexão, resistência à compressão, perpendicular e paralela às fibras, resistência à tração, perpendicular e paralela às fibras, e resistência ao cisalhamento) de madeiras de 57 espécies de árvores coníferas, de madeiras de 183 espécies de árvores dicotiledôneas, de 146 composições de compósitos termoplásticos experimentais (desenvolvidos em estudos científicos) e de 25 composições de compósitos termoplásticos já comercializados. Os dados de densidade e de resistência mecânica foram retirados das referências mostradas no Quadro 3.

Ressalta-se que dentro dos documentos analisados, um artigo científico pode ter estudado mais de uma composição de compósito termoplástico, assim como pode ter sido obtido dados de diferentes compósitos produzidos por um mesmo fabricante. Além disso, para várias espécies de madeira e de compósitos analisados só havia dados referentes à algumas propriedades mecânicas, dentro das várias estudadas. Ainda, considerou-se que a resistência paralela e perpendicular às fibras, tanto à compressão como à tração, dos compósitos termoplásticos são iguais, uma vez que em quase a totalidade dos casos (tanto para os compósitos desenvolvidos em estudos como para aqueles produzidos em escala comercial) esse material é produzido misturando-se as cargas vegetais e/ou minerais à matriz plástica de forma aleatória, ou seja, sem realizar uma orientação específica das fibras vegetais e/ou minerais, quando estas são usadas.

Quadro 3: Referências utilizadas no levantamento.

TIPO DE MATERIAL	REFERÊNCIAS
Madeiras de espécies coníferas	(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009)
Madeiras de espécies dicotiledôneas	(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009, 2013)
Compósitos termoplásticos experimentais	(ADHIKARY; PANG; STAIGER, 2008a; BEG; PICKERING, 2008; KUO et al., 2009; MIGNEAULT et al., 2009; NOURBAKHSH; ASHORI, 2009; YEMELE et al., 2010; FABIYI; MCDONALD, 2010; ADHIKARY et al., 2011; ENGLUND; VILLECHEVROLLE, 2011; LEU et al., 2012; ASUKE et al., 2012; AYRILMIS et al., 2012; BUYUKSARI; AYRILMIS; AKBULUT, 2012; OZEN et al., 2013; WEI et al., 2013; AGUNSOYE; AIGBODION, 2013; SINGH et al., 2014; TABKHPAZ SARABI et al., 2014; KIZILTAS et al., 2014; RAJA; KUMARAVEL, 2015)
Compósitos termoplásticos comercializados	(BRAUN INTERTEC CORPORATION, 1997; LEGAL COMPLIANCE DEPARTMENT, 2004; MASTER MARK PLASTICS INC., 2005, 2015; ECO-TECH PLASTICS, 2006b; UNIVERSAL FOREST PRODUCTS, 2009; GREEN BAY DECKING, 2009b; BAYER, 2012; PLASTICWOOD.IT, 2012; PLASTRUCT POLYZONE, 2012; EKOPLUS, 2014; BEDFORD TECHNOLOGY, 2015; TREX COMPANY, 2015; PLASTEAK INC., 2015)

A partir do levantamento pôde-se concluir que a densidade das madeiras varia de 300kg/m³ a 1200kg/m³ enquanto a dos compósitos termoplásticos varia de 650kg/m³ a 1300kg/m³. Porém, dos 171 compósitos termoplásticos analisados (146 experimentais somados aos 25 comercializados), 152, isto é, 89%, possuem valores de densidade maiores que 900kg/m³. Enquanto que das 245 espécies de madeira (coníferas e dicotiledôneas), apenas 31 possuem densidade acima de 900kg/m³, ou seja, cerca de 13%.

Além disso, os dados de resistência e densidade mostram que os compósitos termoplásticos apresentam potencial para substituir a madeira em situações nas quais esta sofre esforços de tração (Figura 11) ou compressão (Figura 12) perpendiculares às fibras, uma vez que as resistências específicas (resistência/densidade) dos compósitos a esses esforços são maiores que as da madeira (Figuras 13 e 14). Em outras palavras, em casos nos quais uma determinada peça de madeira estaria comprimida ou tracionada perpendicularmente às suas fibras, uma peça em compósito termoplástico suportaria a mesma carga possuindo menores dimensões. No entanto, ressalta-se que foram encontrados apenas 2 artigos científicos que pesquisaram sobre a resistência à compressão dos compósitos termoplásticos que apresentaram dados suficientes para serem considerados nesse levantamento (alguns artigos apresentavam a resistência à compressão, mas não os valores de densidade dos materiais).

Figura 11: Gráfico de Ashby apresentando a resistência à tração perpendicular às fibras x densidade para várias madeiras e composições de compósitos termoplásticos.

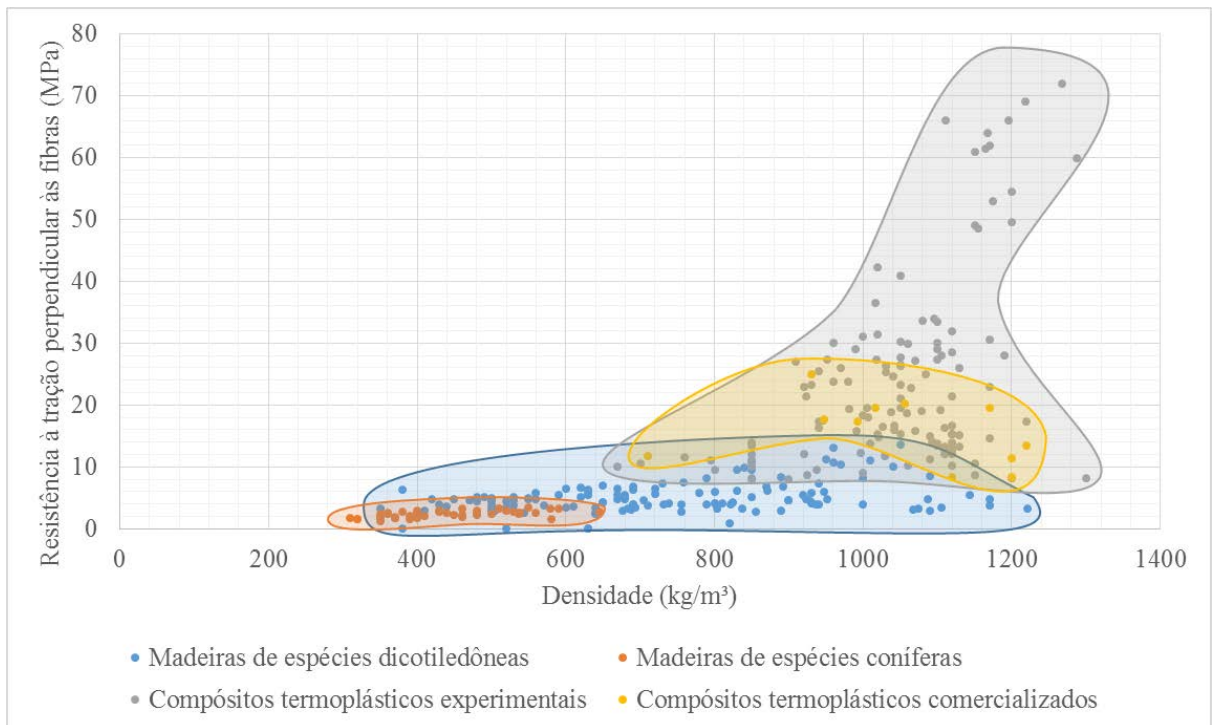


Figura 12: Gráfico de Ashby apresentando a resistência à compressão perpendicular às fibras x densidade para várias madeiras e composições de compósitos termoplásticos.

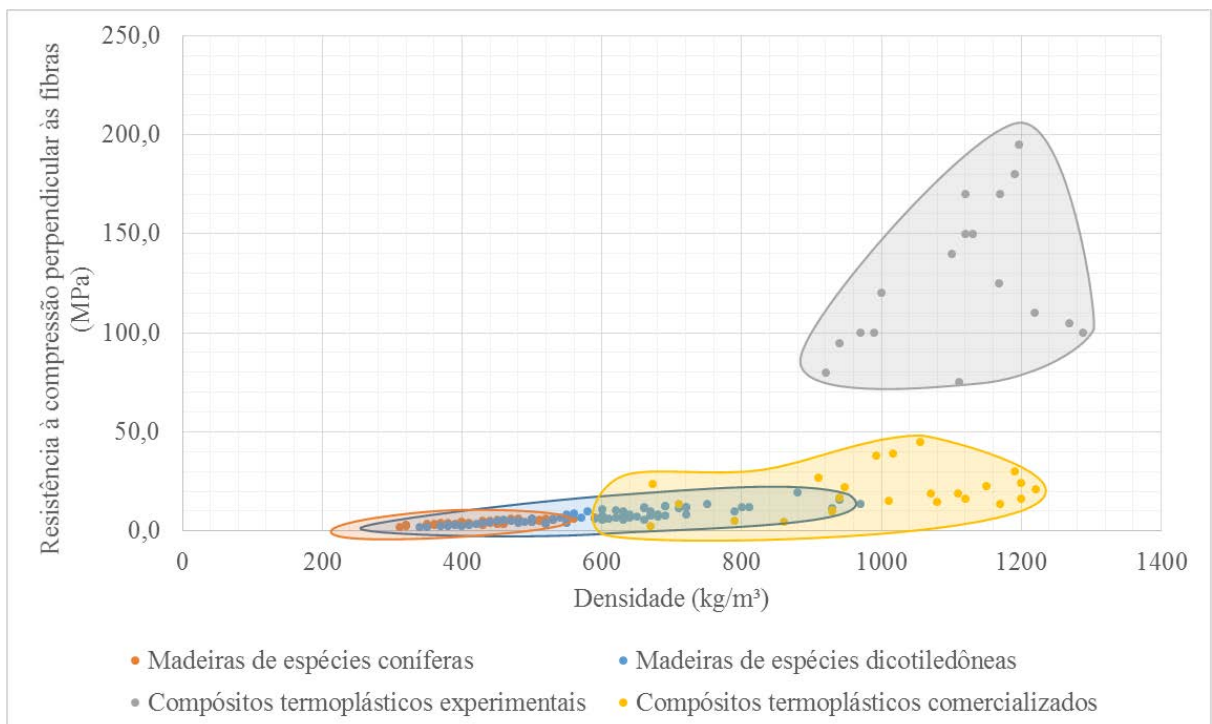


Figura 13: Resistência à tração perpendicular às fibras específica de várias madeiras e compósitos termoplásticos. As médias das resistências específicas dos materiais foram calculadas utilizando dados de 44

espécies coníferas, 130 espécies dicotiledôneas, 127 compósitos termoplásticos experimentais de 17 artigos científicos e 11 compósitos termoplásticos comercializados de 9 fabricantes.

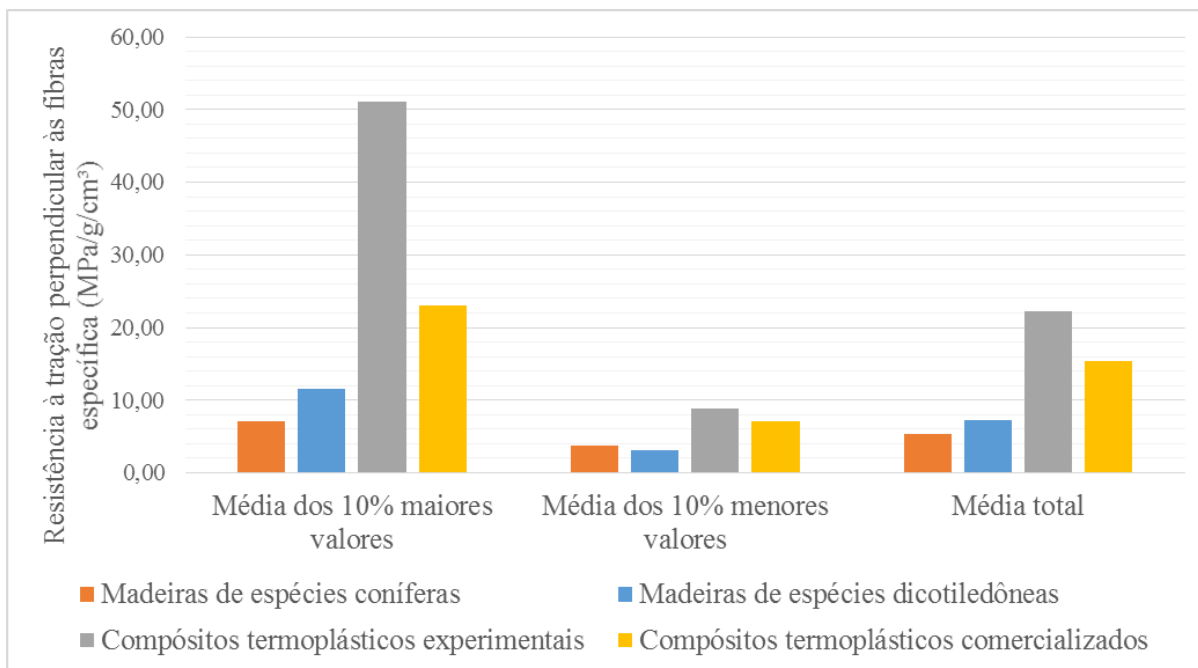
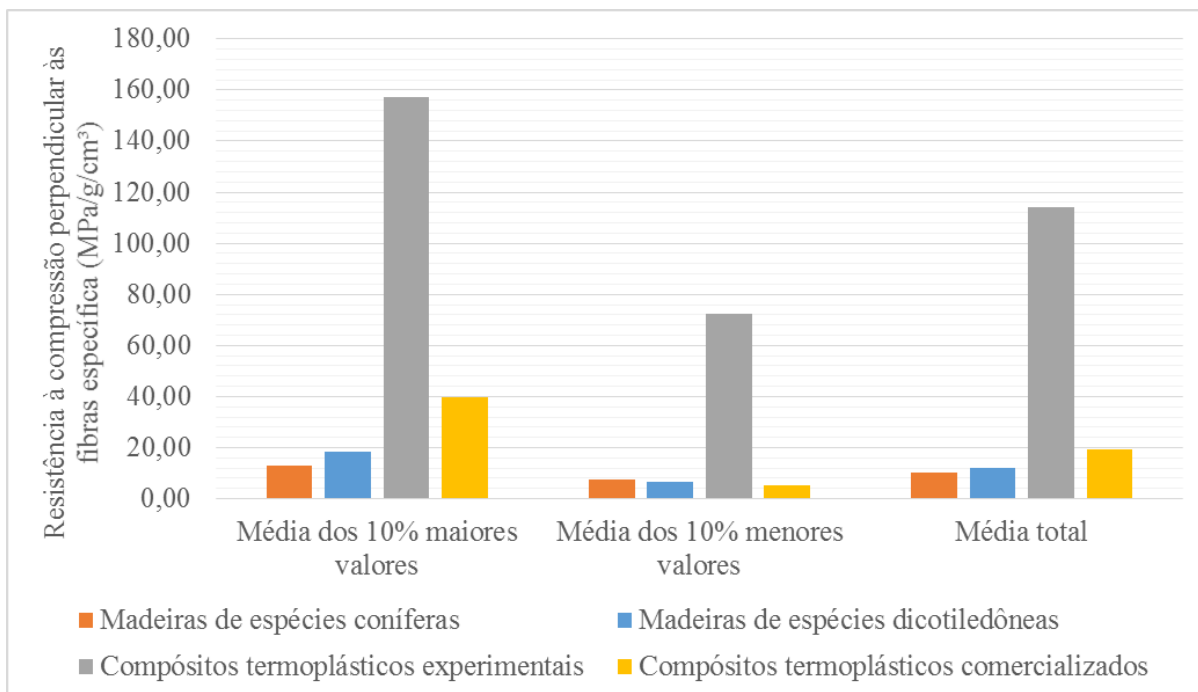


Figura 14: Resistência à compressão perpendicular às fibras específica de várias madeiras e compósitos termoplásticos. As médias das resistências específicas dos materiais foram calculadas utilizando dados de 47 espécies coníferas, 75 espécies dicotiledôneas, 17 compósitos termoplásticos experimentais de 2 artigos científicos e 24 compósitos termoplásticos comercializados de 19 fabricantes.



Excetuando esses esforços, a resistência à compressão paralela às fibras é a única propriedade na qual os compósitos termoplásticos possuem (de fato, apenas os compósitos desenvolvidos em trabalhos científicos possuem), em geral, maiores valores de resistência que a madeira (Figura 15). Apesar de que foram encontrados apenas 2 artigos científicos que pesquisaram

sobre a resistência à compressão dos compósitos termoplásticos que apresentaram dados suficientes para serem considerados nesse levantamento, como explicado anteriormente. Por outro lado, quando se analisa os compósitos comercializados, os maiores valores de resistência à compressão destes são similares aos valores medianos e mais baixos das madeiras coníferas e dicotiledôneas, respectivamente. Entretanto, os maiores valores de densidade dos compósitos os tornam menos eficientes que a madeira (Figura 16). Se forem comparados os valores de resistência mais altos das madeiras com os valores mais altos dos compósitos comercializados, estes ainda estão longe de alcançar uma resistência à compressão semelhante à daquela.

Figura 15: Gráfico de Ashby apresentando a resistência à compressão paralela às fibras x densidade para várias madeiras e composições de compósitos termoplásticos.

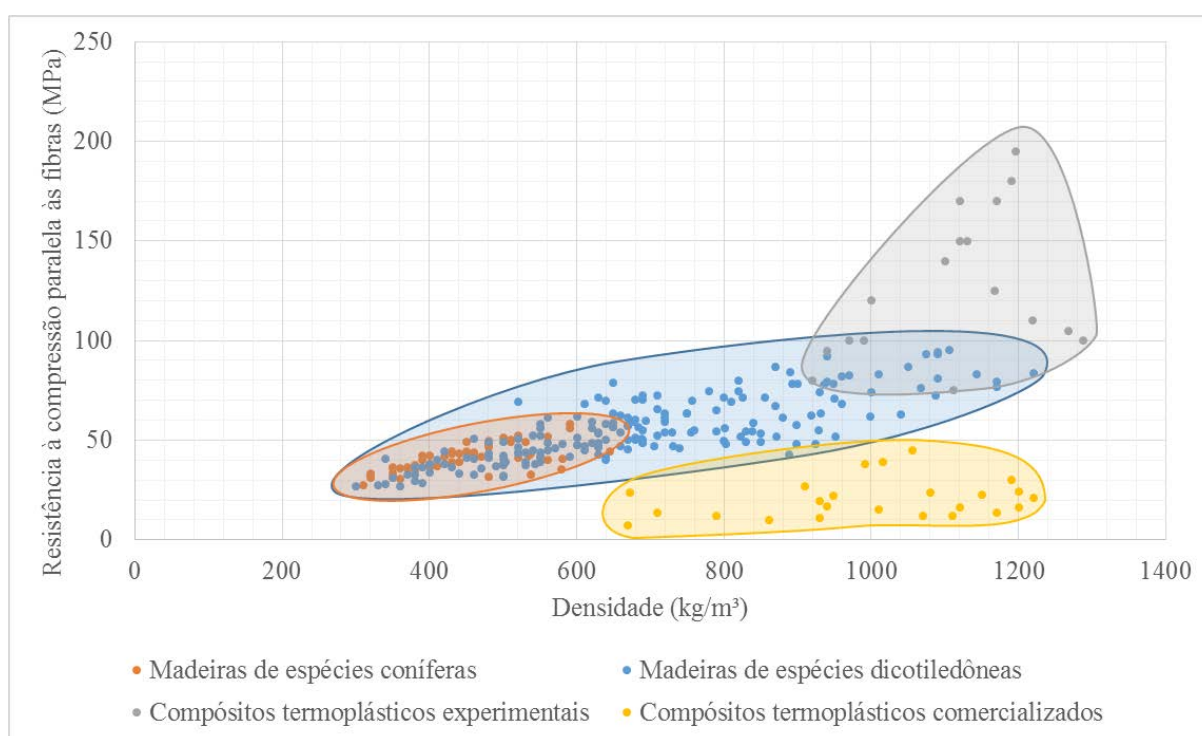
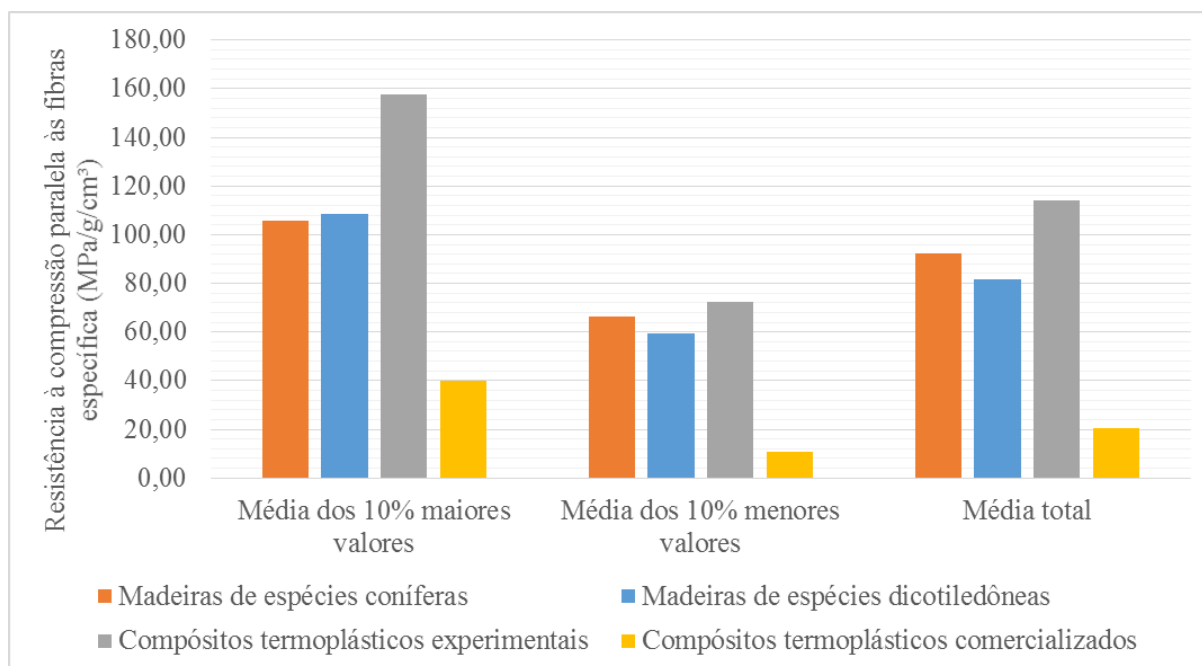


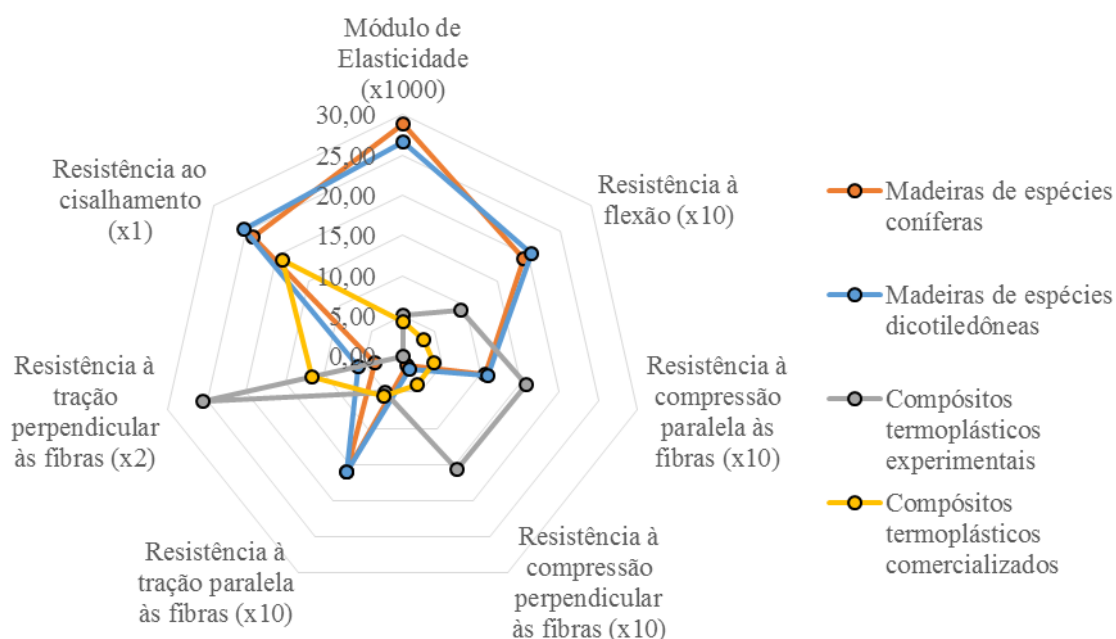
Figura 16: Resistência à compressão paralela às fibras específica de várias madeiras e compósitos termoplásticos. As médias das resistências específicas dos materiais foram calculadas utilizando dados de 57

espécies coníferas, 188 espécies dicotiledôneas, 17 compósitos termoplásticos experimentais de 2 artigos científicos e 24 compósitos termoplásticos comercializados de 19 fabricantes.



Para todas as outras propriedades a madeira continua possuindo resistências específicas maiores que a dos compósitos termoplásticos, isto é, continua mais eficiente mecanicamente. Isso significa que, analisando-se números gerais, para todos os outros esforços a madeira suporta uma determinada carga com elementos menores e mais leves (Figura 17).

Figura 17: Propriedades específicas dos materiais. Valores referentes às médias dos 10% maiores valores de cada tipo de material. Não foram encontrados dados de resistência ao cisalhamento referentes aos compósitos experimentais. Unidade dos valores: MPa/g/cm³.



Nos próximos itens é explicado como a inserção de resíduos plásticos e vegetais, materiais utilizados corriqueiramente na produção de madeira plástica, afetam suas características mecânicas. A partir de um maior conhecimento a respeito da composição do material e a implicação dela para sua resistência mecânica, pode ser selecionado aquele que propicia o melhor comportamento à determinada situação.

3.3.3.1 Resistência aos esforços mecânicos de compósitos termoplásticos fabricados com resíduos plásticos

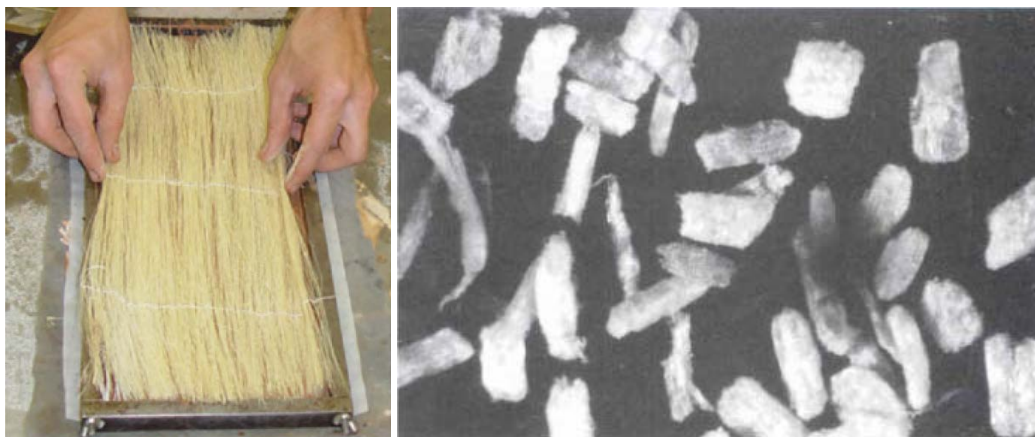
Pesquisas mostram que o uso de resíduos plásticos na produção de compósitos termoplásticos tende a não alterar o módulo de elasticidade e as resistências à flexão e à tração desses. Porém, tende a reduzir sua resistência ao impacto (NAJAFI; HAMIDINA; TAJVIDI, 2006; ADHIKARY; PANG; STAIGER, 2008a; BEG; PICKERING, 2008; NAJAFI, 2013).

3.3.3.2 Resistência aos esforços mecânicos de compósitos termoplásticos com cargas vegetais

Apesar de alguns estudos apresentarem resultados opostos (STARK; ROWLANDS, 2003; ADHIKARY; PANG; STAIGER, 2008a; KUO et al., 2009), observa-se uma tendência de aumento da resistência à flexão e do módulo de elasticidade, e de diminuição da resistência à tração dos compósitos com o aumento da carga vegetal em sua composição.

Ressalta-se que compósitos com cargas vegetais em forma de fibra de modo geral apresentam resistência à flexão diretamente proporcional à quantidade de fibras empregadas em sua composição (KLYOSOV, 2007), exibindo desempenho superior aos elementos puramente plásticos e, também, superior àqueles que possuem cargas vegetais em formato tendendo ao granular, como serragem e farinha de madeira (Figura 18) que, por sua vez, podem causar uma queda na resistência do compósito a esse esforço (STARK; ROWLANDS, 2003; KLYOSOV, 2007). A melhoria do desempenho mecânico de compósitos com fibras vegetais é devida ao seu próprio entrelaçamento (KIM et al., 2008) e ao seu entrelaçamento na matriz polimérica, tendo como consequência a melhor união entre as duas fases do compósito (KLYOSOV, 2007).

Figura 18: À esquerda: fibra de sisal. À direita: imagem ampliada de farinha de madeira.



Fontes: Silva, Mobasher e Toledo Filho (2010, p. 5508); Stark e Rowlands (2003, p. 170).

3.4 Sistemas construtivos

Foi realizada revisão bibliográfica a respeito de sistemas construtivos que empregam como material principal a madeira plástica e também sobre os que adotam outros materiais, a fim de identificar aqueles que mais se adequam às características da edificação e das ilhas oceânicas e que, com isso, possam ser adotados como já projetados ou que apenas necessitem sofrer algumas modificações.

3.4.1 *Sistemas construtivos em outros materiais*

Sistemas construtivos em outros materiais, principalmente em madeira serrada, foram pesquisados a fim de encontrar e compreender o funcionamento daqueles que poderiam ser adotados utilizando a madeira plástica ao invés do material para os quais foram inicialmente pensados. Por possuir características de trabalhabilidade semelhantes à da madeira serrada – como a possibilidade de corte e de uso de pregos e parafusos – (KLYOSOV, 2007; CALKINS, 2009), algumas técnicas construtivas passíveis de se empregar a madeira plástica são as que normalmente se emprega a madeira serrada. Entretanto, há a necessidade de construir protótipos para verificar a real adequação e desempenho do sistema proposto.

3.4.1.1 Sistema construtivo pilar e viga com paredes simples

Uma técnica construtiva com chance de emprego de madeira plástica é a que foi utilizada na Estação Científica da Reserva Biológica do Atol das Rocas e é explicada por Woelffel e Alvarez (2009), o sistema em pilar e viga com paredes simples. A Estação foi construída em painéis simples e montantes de madeira maciça, conformando os ambientes da edificação (Figura 19).

Figura 19: Construção da Estação Científica da Reserva Biológica do Atol das Rocas.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

As extremidades dos montantes possuem elementos intitulados “espigas” (encaixes para a viga do piso e dos frechais da cobertura) que fazem o fechamento das vedações. Já o entabuoamento de piso é suportado por vigas primárias e secundárias. Como um dos principais condicionantes de construções para ilhas oceânicas é a facilidade de transporte dos componentes, os autores destacam que as peças foram fabricadas e dimensionadas considerando condições de transporte restritivas, como o deslocamento das peças por bote inflável e pela força humana (Figura 20).

Figura 20: Transporte das peças de madeira por botes infláveis.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

Nesse sistema as peças de madeira serrada são encaixadas e aprumadas umas sobre as outras, como os componentes das vedações, que possuem encaixe macho-fêmea (WOELFFEL; ALVAREZ, 2009), como mostra a Figura 21. Para a fixação de algumas peças também foram empregados elementos de ligação metálicos (parafusos, porcas, cantoneiras e pregos). Vale ressaltar que podem ser encontrados no mercado perfis de madeira plástica já fabricados com formato macho-fêmea, o que facilita seu emprego em sistema construtivo similar ao descrito.

Figura 21: Peças de madeira serrada das vedações com encaixe macho-fêmea.



Fonte: Acervo do LPP- UFES.

3.4.1.2 Sistema construtivo viga-laje

Já na Estação Científica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Alvarez (2003) relata que o sistema estrutural utilizado foi o denominado sistema viga-laje: tábuas de madeira serrada com aproximadamente as mesmas dimensões em todo o edifício e compondo o piso, vedações e cobertura devendo, para isso, serem instaladas justapostas. As tábuas de todos os sistemas (piso, vedações e cobertura) são transpassadas por barras de aço (vergalhões), como mostra a Figura 22, sendo que algumas destas também transpassam elementos de outros sistemas, ligando-os e tornando todo o edifício um sistema monolítico (Figura 23). No caso do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, tal medida foi tomada para prover segurança aos usuários da Estação, uma vez que no local a ocorrência de abalos sísmicos é constante. Assim,

caso algum sismo de maior intensidade ocorra, a chance de que elementos da construção se desprendam e atinjam as pessoas se torna reduzida (ALVAREZ, 2003).

Destaca-se que uma das características do sistema viga-laje é que ele requer menor beneficiamento das peças de madeira, visto prescindir de cortes e entalhes para realizar a ligação entre elas.

Figura 22: Construção da Estação Científica do ASPSP. É possível visualizar uma peça de madeira de vedação sendo encaixada nas barras de aço por dois integrantes da equipe de montagem do edifício.



Fonte: Acervo do LPP- UFES.

Figura 23: Detalhe do sistema viga-laje. As várias peças de madeira justapostas são transpassadas pelos vergalhões formando as vedações e o piso da Estação.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

3.4.1.3 Sistema construtivo em pilar e viga com parede dupla

Os componentes básicos desse sistema são semelhantes aos do sistema de pilar e viga com paredes simples, sendo a maior diferença entre eles as vedações formadas por paredes duplas (uma externa e outra interna), que causam grande influência no conforto termoacústico e na estanqueidade da edificação (Figura 24).

Figura 24: Modelos 3D mostrando o sistema construtivo pilar e viga com parede dupla. É possível ver o espaço formado entre as duas paredes que pode ser preenchido com material isolante.



Fonte: Ideal casas, acesso em: 13 nov. 2014.

Além disso, a camada de ar formada entre as paredes externa e interna pode ser substituída por material isolante, como o poliestireno expandido (EPS), a lã de rocha e a lã de vidro, tendo ainda mais impacto no conforto ambiental dos usuários.

Quando as paredes externa e interna são construídas como elemento único, isto é, interligadas por outras peças, como montantes, o sistema construtivo em parede dupla apresenta maior rigidez estrutural e maior resistência às deformações, podendo ser usado como elemento estruturante da edificação, apesar de encarecer a solução (REBELLO, 2007).

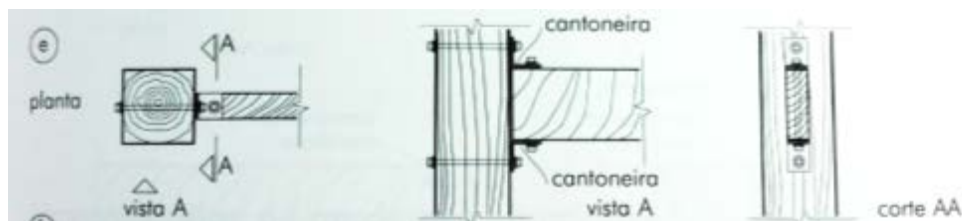
3.4.1.4 Ligações entre peças de madeira

Este item apresenta algumas ligações – encaixes e fixação por elementos metálicos – comumente empregadas em peças de madeira como pilares (Figura 25) e vigas e estruturas de coberturas e que, a princípio, também poderiam ser empregadas em componentes de madeira plástica. Vale ressaltar que Rebello (2007) expõe que sempre que possível deve-se dar preferência a ligações de peças feitas por encaixe, para que se diminua a interferência causada

pelo emprego de materiais com propriedades diferentes, como o aço dos parafusos. Contudo, a ligação por encaixe exige uma perfeita execução para que não ocorra folgas entre as peças e haja a correta transmissão de esforços entre elas (REBELLO, 2007).

Existem outras ligações de comum emprego em componentes de madeira além das que são mostradas neste item, havendo também a possibilidade de se criar outras formas de ligação.

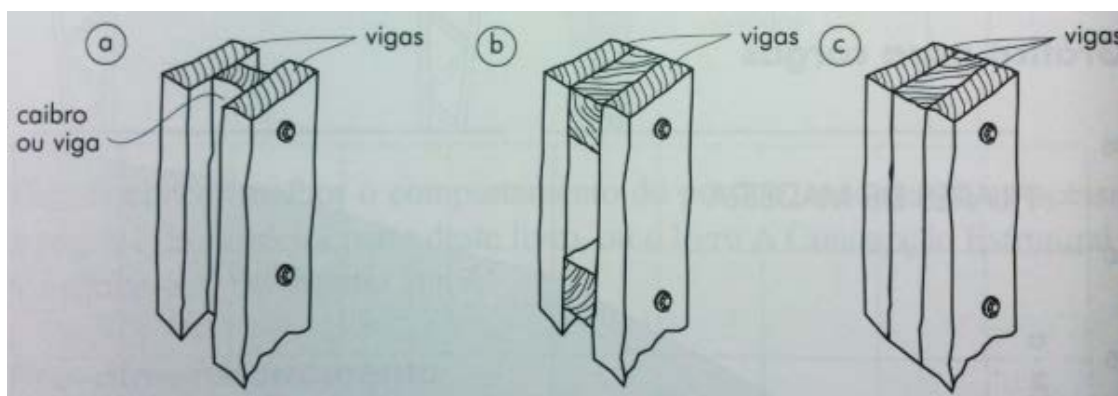
Figura 25: Ligação comum entre vigas e pilares (viga x pilar) de madeira.



Fonte: Rebello (2007, p. 264-265).

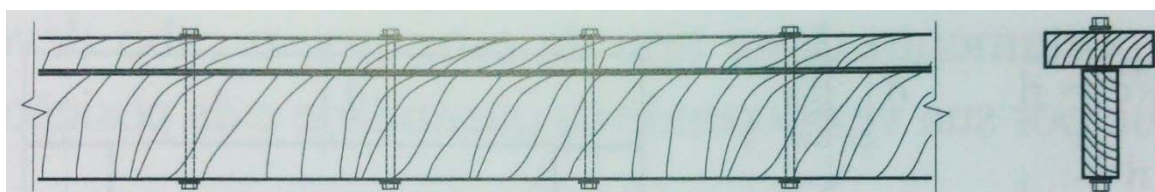
Também pode se utilizar peças de menor largura (como vigas ou caibros, por exemplo) rigidamente conectadas por meio de parafusos ou barras de aço, a fim de formar um elemento de menor esbeltez e mais resistente aos esforços mecânicos, como os pilares de madeira mostrados na Figura 26 e a viga mostrada na Figura 27. Esse mesmo raciocínio pode ser empregado para criar componentes de madeira plástica com diferentes formas uma vez que ela é comercializada em dimensões semelhantes à da madeira serrada.

Figura 26: Pilares de madeira formados pela composição de peças de diferentes dimensões.



Fonte: Rebello (2007, p. 259).

Figura 27: Viga de madeira formada pela composição de peças de diferentes dimensões.



Fonte: Rebello (2007, p. 255).

3.4.2 Sistemas construtivos em madeira plástica

Parente e Pinheiro (2008) explicam que, devido à baixa rigidez dos materiais plásticos, isto é, sua maior facilidade de deformar, sistemas construtivos que adotam esses materiais deverão ser projetados a fim de limitar tais deformações. Além disso, segundo os autores, a exposição dos plásticos a altas temperaturas, como as de chamas ou as de um incêndio, fazem sua rigidez diminuir. Assim, estes fatos somados à especificação da composição da madeira plástica a ser utilizada devem ser levados em consideração no projeto de sistemas construtivos para edificações.

Decks, bancos, pergolados e outros componentes de madeira plástica geralmente utilizam perfis produzidos com dimensões semelhantes às peças de madeira serrada (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), podendo haver bitolas quadradas, retangulares, redondas e com diversas variações de largura e espessura (Figura 28). Além das bitolas apresentadas na figura existem outras, variando de acordo com o fabricante.

Figura 28: Perfis de madeira plástica comercializados pela empresa Ecowood.

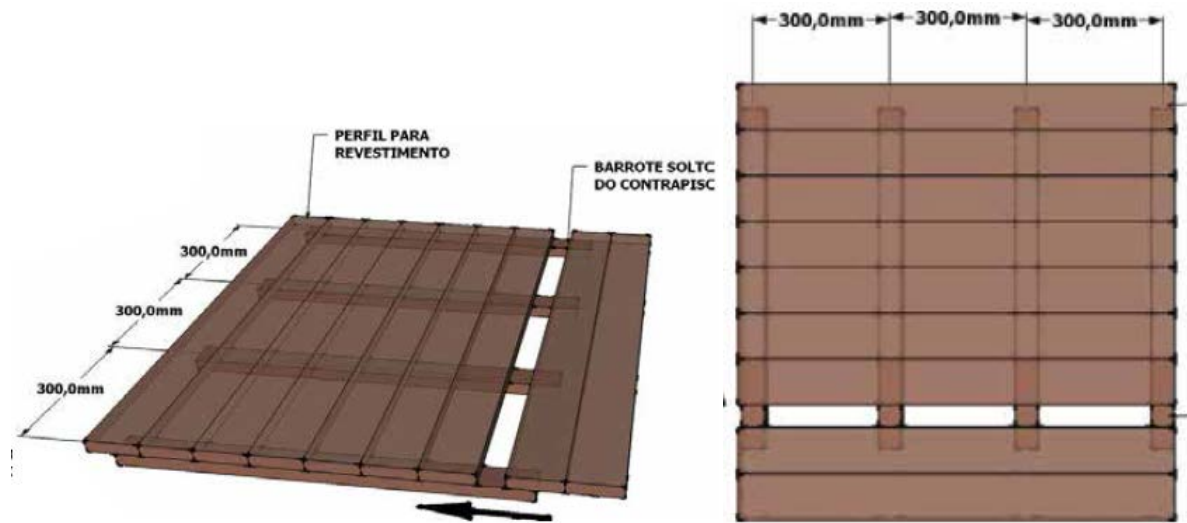


Fonte: Ecowood (2014).

3.4.2.1 Sistemas de piso e decks

Foram consultados os *websites* de empresas fabricantes de pisos e *decks* de madeira plástica a fim de identificar os esquemas de montagem, as dimensões das peças e os vãos e espaçamentos entre elas utilizadas com frequência. De modo geral, na execução dos pisos e *decks* emprega-se sistema semelhante ao da madeira serrada, conforme já mencionado no item 3.4.1.1, ou seja, vigas primárias e secundárias que suportam as tábuas de piso (Figura 29).

Figura 29: Esquema de posicionamento de peças de *deck* de madeira plástica. Para entabuoamento com 25mm de espessura, o fabricante recomenda um espaçamento entre as vigas de apoio igual a 300mm.



Fonte: ECOBLOCK ([s.d.], p. 9).

3.4.2.2 Ligações entre peças de madeira plástica

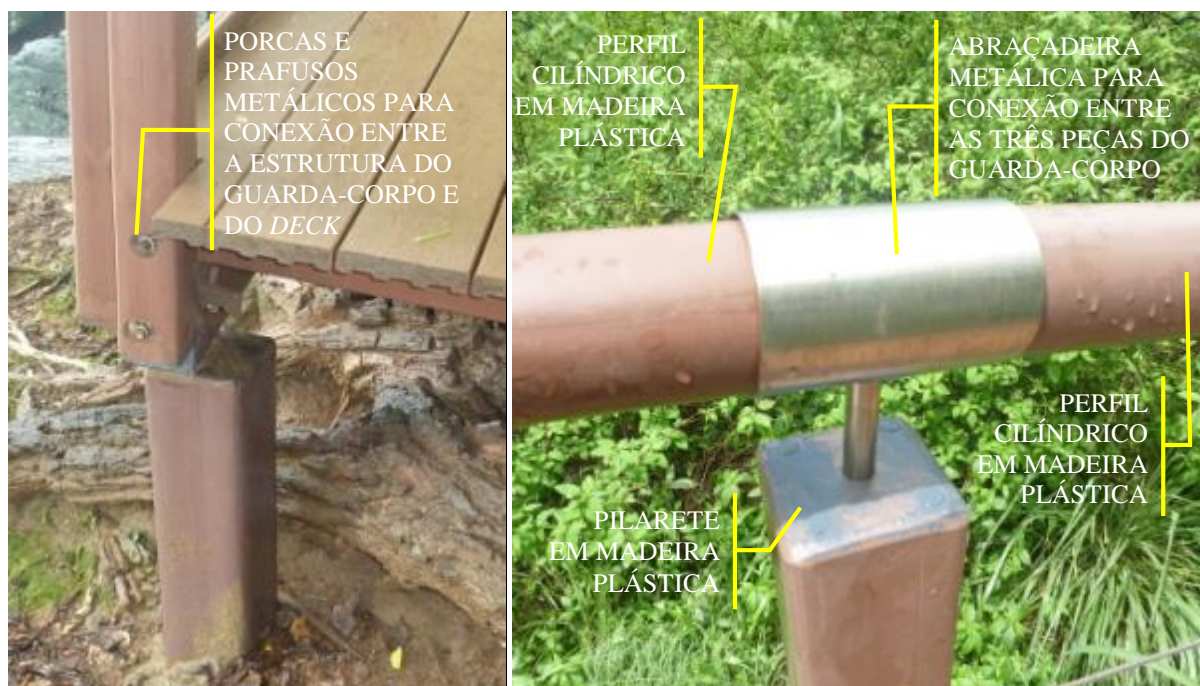
Para a conformação de componentes e sistemas mais complexos, como os guarda-corpos e *decks* mostrados na Figura 30, com detalhe das ligações entre as peças mostradas na Figura 31, os sistemas construtivos em madeira plástica geralmente utilizam encaixes entre os perfis, além de elementos de ligação metálicos, como parafusos, porcas e cantoneiras.

Figura 30: Guarda-corpos e *decks* construídos em madeira plástica no Arquipélago de Fernando de Noronha.



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

Figura 31: Elementos metálicos de ligação entre as peças de madeira plástica (Arquipélago de Fernando de Noronha).



Fonte: Acervo do LPP-UFES.

3.5 Normas técnicas

Foi realizada uma seleção de normas técnicas nacionais e internacionais, principalmente americanas, que tratassem de compósitos termoplásticos, madeira plástica e de produtos ou sistemas construtivos que empregassem esses materiais, a fim de obter uma referência para a definição do sistema construtivo a ser proposto para as estações científicas e também para o seu desempenho. Assim, seguem explicitadas as normas encontradas e que foram utilizadas como referência para o alcance do objetivo desta pesquisa.

3.5.1 Normas técnicas nacionais

Não existem normas técnicas brasileiras específicas para compósitos termoplásticos, para madeira plástica ou para produtos e sistemas de construção feitos a partir deles. No entanto, por ser uma norma que dita o desempenho que sistemas construtivos devem apresentar, a NBR 15575 de 2013, intitulada “Edificações Habitacionais – Desempenho” e dividida em seis partes, é aplicável a sistemas construtivos confeccionados a partir de qualquer material ou combinação de materiais, devendo um sistema inovador que se pretende comercializar cumprir todas as suas exigências. Nesse sentido, essa norma é utilizada pelo Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de produtos inovadores do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat como

base para a avaliação de sistemas construtivos pouco conhecidos ou que ainda não foram testados.

A NBR 15575 trata do desempenho de sistemas estruturais, sistemas de piso, sistemas de vedações verticais internas e externas, sistemas de cobertura e sistemas hidrossanitários. O desempenho desses sistemas deve ser verificado nas seguintes áreas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013c):

- Segurança: segurança estrutural; segurança contra o fogo; segurança no uso e na operação.
- Habitabilidade: estanqueidade; desempenho térmico; desempenho acústico; desempenho lumínico; saúde, higiene e qualidade do ar; funcionalidade e acessibilidade; conforto tátil e antropodinâmico.
- Sustentabilidade: durabilidade; manutenibilidade; impacto ambiental.

Para a avaliação do desempenho do sistema nas áreas citadas, a norma prevê que sejam realizadas análises em projetos, simulações, ensaios laboratoriais, ensaios de tipo, ensaios em campo (*in loco*) e inspeções em protótipos ou em campo.

3.5.2 Normas técnicas internacionais

Foram realizadas buscas de normas técnicas americanas que tratassem de madeira plástica na base de dados da ASTM e da ISO (*International Organization for Standardization*).

Na base de dados da ISO foram encontradas normas tratando apenas de uma outra categoria de compósitos plásticos, os *Fibre-Reinforced Plastic composites* (FRP), que frequentemente empregam plásticos e cargas diferentes dos utilizados na fabricação da madeira plástica (como fibra de carbono e de vidro), além de possuírem usos também distintos, como partes de aeronaves, de carros, de navios, de componentes industriais e também de componentes para a construção civil (ADVANCED MANUFACTURING OFFICE, 2014).

Já na base de dados da ASTM não foram encontradas normas que abordassem a madeira plástica como um material a ser adotado para sistemas de vedações ou de estruturas para edificações. Porém, as normas D7568 – *Standard specification for polyethylene-based structural-grade plastic lumber for outdoor applications* – (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013a); D7032 – *Standard specification for establishing performance ratings for wood-plastic composite deck boards and guardrail systems (guards or*

handrails) – (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010); e D6662 – *Standard specification for polyolefin-based plastic lumber decking boards* – (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013b), tratam de elementos estruturais em madeira plástica como pilares, pilaretes, vigas, guarda-corpos, corrimãos e tabuados, utilizados em áreas externas para conformar *decks*, píeres, docas e plataformas. Tais normas estabelecem parâmetros de desempenho dos elementos estruturais citados nos seguintes aspectos:

- Resistência mecânica;
- Resistência à ignição e à propagação do fogo (neste item a madeira plástica deve possuir desempenho no mínimo igual ao da madeira);
- Comportamento sob a ação da temperatura, da umidade e dos raios ultravioletas (devendo ser avaliado a ocorrência de dilatações, retrações, inchamentos, descoloração, oxidação e redução do desempenho mecânico);
- Resistência ao ataque de micro-organismos e insetos, respectivamente fungos e cupins, por exemplo (neste item a madeira plástica deve possuir desempenho no mínimo igual ao de madeiras tratadas ou de madeiras naturalmente resistentes à biodegradação); e
- Aderência (no caso de pisos e *decks*).

Para a realização de ensaios em cada aspecto citado as normas exigem uma quantidade de corpos de prova diferente. Além disso, quando o que vai ser testado são peças individuais, como pilaretes e tábuas, o número de corpos de prova exigido é maior, chegando a ser próximo de 20 ou 30. Contudo, quando o que se deseja avaliar é um sistema mais complexo, como guarda-corpos (formados por várias peças) o número de corpos de prova é menor, cerca de 5.

4 DESENVOLVIMENTO E DETALHAMENTO DO SISTEMA CONSTRUTIVO

A seguir é apresentado sucintamente o processo de desenvolvimento do sistema construtivo e do painel estrutural de vedação e seu posterior detalhamento.

4.1 Desenvolvimento do sistema construtivo

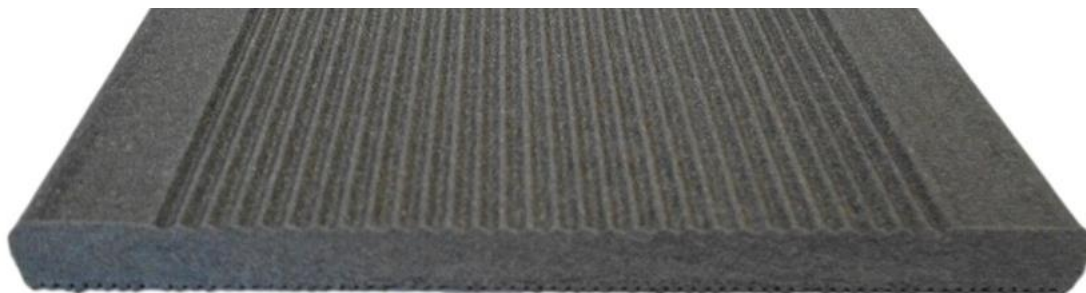
Com base nas pesquisas sobre ilhas oceânicas, suas características climáticas e físicas, sobre as dificuldades de transporte de materiais para tais locais, sobre a madeira plástica, sua resistência mecânica e elasticidade quando submetida aos vários esforços (flexão, tração e compressão), coeficiente de dilatação e sobre as formas de ligação entre as peças (parafusos, pregos e barras rosqueadas) e sua influência no comportamento dos componentes, começou-se a projetar o sistema construtivo para aplicação em edificações nas ilhas oceânicas.

Desde o início já se conjecturou a criação de um sistema construtivo formado por vedação dupla, devido à maior rigidez estrutural e resistência à flambagem proporcionada pela maior espessura das paredes, como um todo. Além disso, a existência de duas vedações somada à camada de ar formada entre elas possui forte impacto no conforto termoacústico da edificação podendo, eventualmente, ainda ser preenchido com algum material isolante. Contudo, tal sistema necessitaria de uma quantidade de materiais maior que a de um sistema formado por vedações simples, por exemplo, o que aumentaria os gastos com a compra e com o transporte de materiais, na fase de construção e montagem e, eventualmente, com a manutenção ao longo da vida útil do edifício.

Por causa dos problemas citados, começou-se a idealizar um sistema construtivo formado por painéis de vedação simples, nos moldes do sistema viga-laje. Com isso, buscava-se superar os problemas enfrentados pelo sistema de vedação duplo e experimentar soluções para a menor rigidez estrutural e conforto termoacústico inerentes ao sistema de vedação simples. A adoção das barras rosqueadas transpassando todas as peças de vedação e conectando-as ao piso e à cobertura busca proporcionar estabilidade, rigidez e segurança estrutural à edificação, além de combater, por meio do aperto das porcas existentes nas extremidades das barras, problemas como frestas causadas pela dilatação e retração dos materiais. Entretanto, conforme os estudos avançaram percebeu-se que uma vedação simples em madeira plástica apresentaria provavelmente grande deformação por flambagem e dificilmente suportaria as cargas da edificação (peso próprio das vedações e carga da cobertura). Por fim, quando foi acordada uma

parceria com a empresa Madeiras Ecológicas, revendedora de madeira plástica produzida pela empresa italiana Plasticwood.it, o desenvolvimento e detalhamento do sistema construtivo começou a ser feito tomando como base os perfis comercializados pela empresa. De fato, nem todos os perfis comercializados por ela possuíam características satisfatórias para a adoção no sistema construtivo ou estavam disponíveis para doação, que ficou acertada após reunião do autor deste trabalho e sua orientadora com o gerente de negócios da empresa. Como exemplo, pode-se citar o perfil sólido com 10mm de espessura (Figura 32), o perfil alveolar com 38mm de espessura (Figura 33) e o perfil sólido com 25mm (Figura 34): os dois primeiros considerados não adequados para a adoção no sistema, devido à pequena espessura e às áreas vazadas, respectivamente, e o terceiro, considerado o perfil ótimo dentre os perfis comercializados pela Madeiras Ecológicas, mas não disponível para doação. Com isso, o fato do perfil sólido mais espesso disponibilizado por ela e considerado adequado para o sistema possuir 21mm (Figura 35) foi determinante para se abandonar o projeto do sistema construtivo viga-laje em parede simples e reiniciar o desenvolvimento do sistema construtivo em parede dupla.

Figura 32: Perfil sólido 120mm x 10mm. Fabricante: Plasticwood.it. Importador e Distribuidor: Madeiras Ecológicas.



Fonte: Madeiras Ecológicas, acesso em 23 nov. 2014.

Figura 33: Perfil alveolar 200mm x 38mm. Fabricante: Plasticwood.it. Importador e Distribuidor: Madeiras Ecológicas.



Fonte: Madeiras Ecológicas, acesso em 23 nov. 2014.

Figura 34: Perfil sólido 140mm x 25mm. Fabricante: Plasticwood.it. Importador e Distribuidor: Madeiras Ecológicas.



Fonte: Madeiras Ecológicas, acesso em 23 nov. 2014.

Figura 35: Perfil sólido 200mm x 21mm. Fabricante: Plasticwood.it. Importador e Distribuidor: Madeiras Ecológicas.

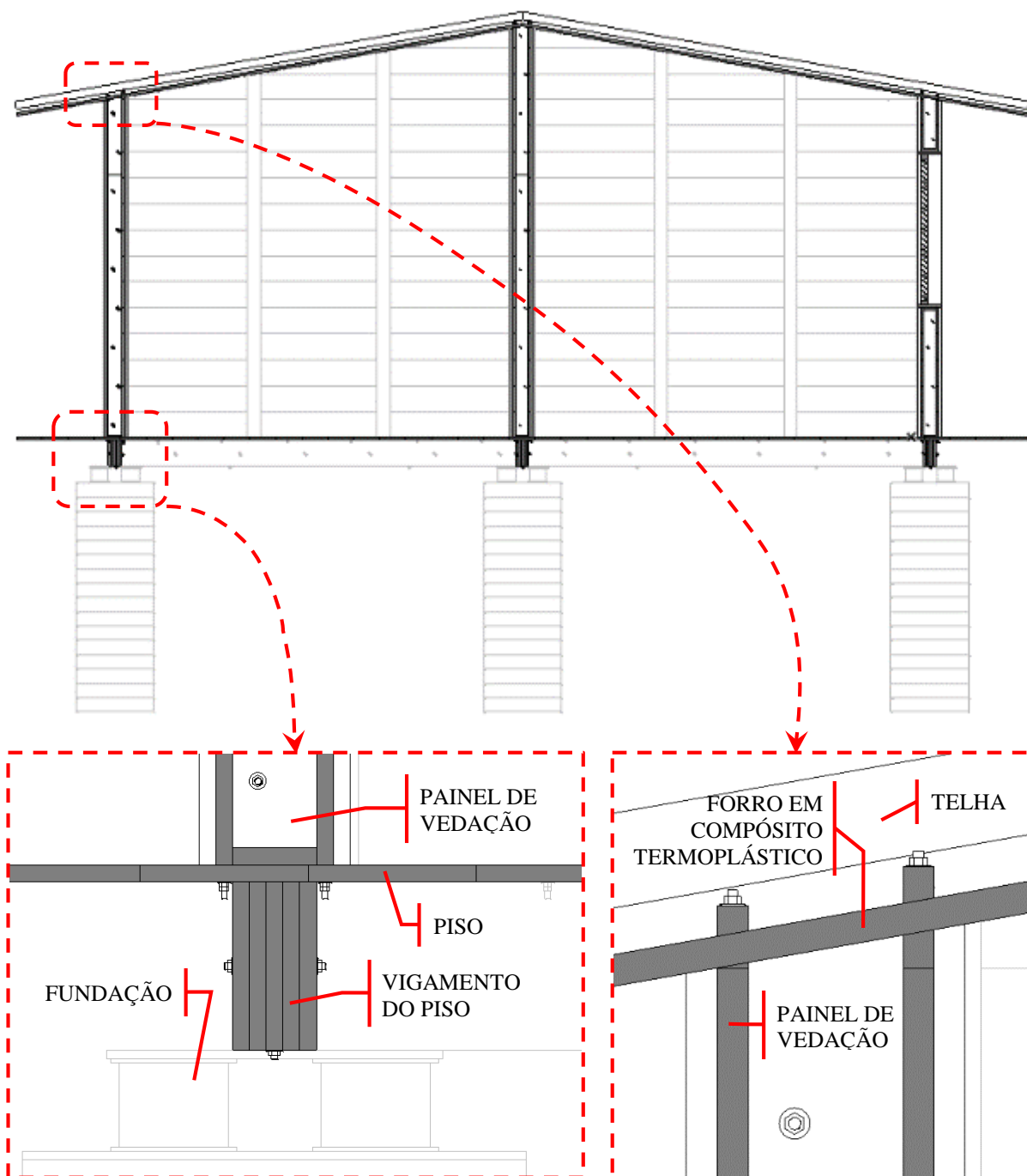


Fonte: Madeiras Ecológicas, acesso em 23 nov. 2014.

O sistema construtivo desenvolvido somou o conceito dos dois sistemas, viga-laje e pilar e viga com parede dupla, e foi denominado “viga-laje duplo”. Entretanto, no sistema viga-laje duplo as vedações são estruturais, sendo responsáveis por suportar seu peso próprio e as cargas da cobertura, semelhante ao sistema viga-laje, mas diferente do sistema pilar e viga com parede dupla.

A fim de criar soluções para o funcionamento do sistema construtivo como um todo, para a conexão entre o piso e as vedações e entre as vedações e a cobertura, por exemplo, fez-se uso do projeto da atual Estação Científica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. A Figura 36 mostra um corte e detalhes da ECASPSP caso ela fosse construída com o sistema desenvolvido neste trabalho.

Figura 36: Aplicação do sistema na ECASPSP. Os detalhes mostram a conexão entre o piso e a vedação e entre a vedação e a cobertura.



Em seguida, apesar de um sistema construtivo englobar outros elementos (como piso, instalações elétricas e hidráulicas, esquadrias e cobertura), prosseguiu-se com o detalhamento exclusivo do painel estrutural de vedação, uma vez que este é o enfoque do trabalho.

É importante ressaltar que buscou-se desenvolver um sistema construtivo com as peças disponíveis, mas que necessitasse da menor quantidade possível de cortes, entalhes, furos e outros processos de modificação e beneficiamento dos perfis. Tal medida foi tomada para

diminuir a quantidade de trabalho e tempo empregados nas etapas anteriores à etapa de construção dos painéis propriamente dita. Como uma das principais características, eles devem ser práticos e fáceis de construir.

Assim, utilizou-se os 22m² de perfis de compósitos termoplásticos de 21mm de espessura doados pela Madeiras Ecológicas (Figura 37) praticamente como são fabricados, ou seja, com os detalhes de frisos e saliências oriundos da fábrica (Figura 38), sendo que o sistema foi projetado buscando-se adaptações para eventuais problemas causados pela geometria das peças.

Ressalta-se que os compósitos são formados, em média, por 40% de PEAD, proveniente de descarte da indústria de plásticos, e 60% de farinha de madeira, resíduo da indústria madeireira e moveleira. Também compõem o material: aditivos antioxidantes, anti raios ultravioletas (UV) e antimicrobianos. De acordo com o fabricante Plasticwood.it, a densidade do compósito é igual a 1246kg/m³, sua absorção de água após imersão por 24h é 0,6% da massa inicial, seu coeficiente de dilatação térmica é 37μm/(m . °C) e seu módulo de elasticidade na flexão é 3936MPa, com um desvio padrão de 375MPa (PLASTICWOOD.IT, 2012).

Figura 37: Perfis de compósito termoplástico doados pela empresa Madeiras Ecológicas para o desenvolvimento da pesquisa. Dimensões dos perfis: 21mm x 200mm x 2000mm (espessura x largura x comprimento).



Figura 38: Vista da seção transversal dos perfis. É possível ver as pequenas saliências existentes nas extremidades dos perfis e os frisos em suas faces.



4.1.1 Painéis estruturais de vedação esboçados e avaliados

Com a definição dos perfis de compósitos termoplásticos a serem utilizados (com dimensões de 21mm x 200mm x 2000mm na espessura, largura e comprimento, respectivamente), foram esboçados e analisados vários painéis de vedação, que se diferenciavam basicamente, pela forma de ligação entre as paredes externa e interna de cada um, pelo modo de conexão entre painéis, pelo modo de fixação das peças (tipos de parafusos e elementos metálicos) e pelas peças de acabamento. Por outro lado, os painéis foram projetados para serem compostos por peças de 1000mm (1,0m) de comprimento, ou seja, a metade do comprimento dos perfis disponíveis, e com altura de 2600mm (2,60m), sendo necessárias 13 peças de 21mm x 200mm x 1000mm superpostas na vertical para cobrir essa dimensão. A altura dos painéis foi definida como 2,60m por considerar-se tal dimensão suficiente para ser o pé-direito de uma edificação construída a partir deles numa estação científica, cujos ambientes são caracteristicamente de áreas reduzidas.

Tanto na parede externa como interna dos painéis de vedação são transpassadas duas barras rosqueadas metálicas cujas extremidades são apertadas por meio de porcas, unindo verticalmente as peças. Na extremidade inferior, também são utilizadas contraporcas, cuja função é impedir o giro e o afrouxamento das outras porcas, causado geralmente por vibrações e movimentações das peças que pressionam. Assim como no sistema viga-laje da ECASPSP, no qual foi utilizada a madeira, tal medida visa causar tensão nas juntas secas e assim impedir

o surgimento de frestas entre as peças de compósito termoplástico causadas por sua dilatação e retração, acentuadas quando o material é exposto a elevadas taxas de umidade e variações de temperatura, condições aos quais os materiais são submetidos diariamente nas ilhas oceânicas.

A barra rosqueada em aço selecionada foi a de 1/4" (~6,4mm), sendo feitos furos de 5/16" (~8,0mm) nas peças de compósito para possibilitar o transpasse das barras. Isso significa que a espessura mínima de material compósito que as envolve é igual a 6,5mm, considerada suficiente para não enfraquecer o material compósito, protegendo as barras e suportando choques e cargas sobre o painel. Como este possui 2,60m de altura e as barras rosqueadas são comercializadas com comprimentos de 1m ou 3m, as barras de 1/4" adquiridas para compor o painel possuem 3m de comprimento.

4.1.2 Escolha do parafuso autoatarraxante

Para a escolha do tipo de parafuso autoatarraxante a ser utilizado no painel, foram adquiridos parafusos em aço com variadas dimensões (Figura 39) e, em seguida, realizados testes de furação nos quais foi observado o comportamento do compósito termoplástico, isto é, o aparecimento de fissuras, inchamentos, quebras, facilidade de penetração nas peças e dificuldade de retirada. Os testes foram feitos com parafuradeira elétrica (modelo Black & Decker GC1200M) e os parafusos eram colocados de duas maneiras distintas: a primeira consistia em parafusá-los nos compósitos sem a execução de nenhuma etapa anterior; a segunda consistia em primeiramente executar um furo guia no compósito (realizado com uma broca de diâmetro igual ou inferior à da haste do parafuso) para posteriormente inserir o parafuso.

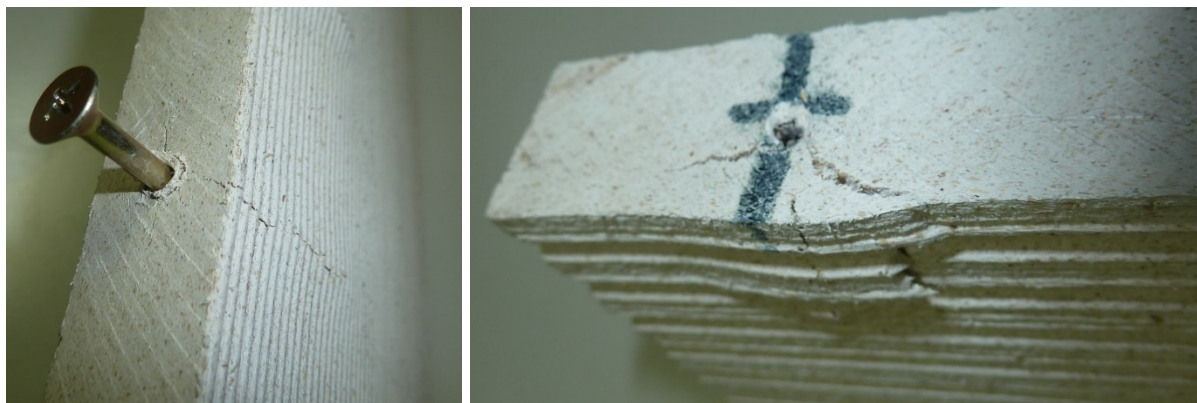
Figura 39: Diferentes tipos de parafusos autoatarraxantes testados. Da esquerda para a direita: 6 x 90; 6 x 69; 5 x 60; 4 x 58; 4,5 x 49; 4 x 49; 4,5 x 39 e 4 x 35 (diâmetro x comprimento, medidas em milímetros).



Durante os testes feitos sem o furo guia, todos os parafusos mostrados na Figura 39 foram considerados com diâmetro não compatível com a espessura das peças de compósitos

termoplásticos, pois conforme os parafusos as perfuravam, apareciam fissuras e ondulações (Figura 40). Tais fissuras facilitariam a entrada de água, umidade e sujeira, e as ondulações dificultariam a conexão e o alinhamento com as demais peças. Além disso, ambos os problemas formam pontos de fragilidade no sistema construtivo.

Figura 40: Fissuras e ondulações causadas por parafusos com diâmetro grande em relação à espessura das peças de compósito. Testes feitos sem a execução de furos guias.



Já quando os furos guias eram feitos – tanto os realizados com uma broca de diâmetro igual como os feitos com uma broca de diâmetro inferior à da haste do parafuso –, o aparecimento de fissuras e de ondulações era reduzido drasticamente. Isso aconteceu devido à existência de uma quantidade menor de material (compósito termoplástico) resistente à entrada do parafuso. Sem os furos guias, conforme os parafusos penetravam nas peças, o material era forçado para as laterais (direção da espessura), causando as fissuras e ondulações. Todavia, considerou-se que fazer furos guias para os parafusos autoatarraxantes, além de demandar mais tempo para a montagem do painel, ainda diminuiria a resistência ao arrancamento, sendo optado então pela escolha de um parafuso com diâmetro menor, mas que pudesse ser parafusado nas peças de compósito sem causar defeitos.

Com isso, foi escolhido um parafuso em aço com as dimensões 3,5mm x 44mm (diâmetro x espessura), ou seja, com diâmetro menor que o de todos os anteriores. Este parafuso, selecionado para compor os painéis de vedação, ainda causava uma pequena ondulação quando perfurava as peças de compósito quando os furos guia não eram executados previamente, entretanto, não havia a formação de fissuras visíveis a olho nu. Apesar de tal problema ter sido percebido em testes iniciais com o parafuso, ele foi escolhido uma vez que não foram encontrados no mercado parafusos com diâmetro menor e com comprimento suficiente para perfurar e conectar duas peças de compósito.

Assim, após a idealização de vários tipos de painéis de vedação, incluindo diferentes formas de disposição das peças e de encaixe entre painéis, foram eliminadas soluções avaliadas como inviáveis e mantidas aquelas vistas como adequadas, chegando-se a um modelo final.

4.2 Projeto final do painel

A Figura 41 mostra o aspecto final do painel e o Apêndice A apresenta o projeto detalhado e as formas de conexão com outros painéis. A área do painel é de $2,6\text{m}^2$ e suas dimensões são $14,2\text{cm} \times 100\text{cm} \times 260\text{cm}$ (espessura x largura x altura), possuindo $0,142\text{m}^2$ (1420cm^2) de seção transversal bruta – isto é, sem desconto dos vazios – e sendo sua altura formada por 13 peças (Figuras 41 e 42). Foi projetado um montante em cada lateral do painel, no entanto, como as peças disponíveis possuíam 200cm de comprimento, cada montante teve de ser composto por duas peças, sendo uma com 200cm e outra complementar com $57,9\text{cm}$, considerando a folga necessária para o encaixe do painel numa guia de piso formada por peças com $2,1\text{cm}$ de espessura, semelhantes às utilizadas para compor os painéis (Figura 43). Tais guias foram idealizadas com a finalidade de auxiliar no alinhamento dos painéis e de solidarizá-los ao piso do edifício, tornando toda a construção mais rígida e estável.

Figura 41: Perspectiva do modelo final do painel.

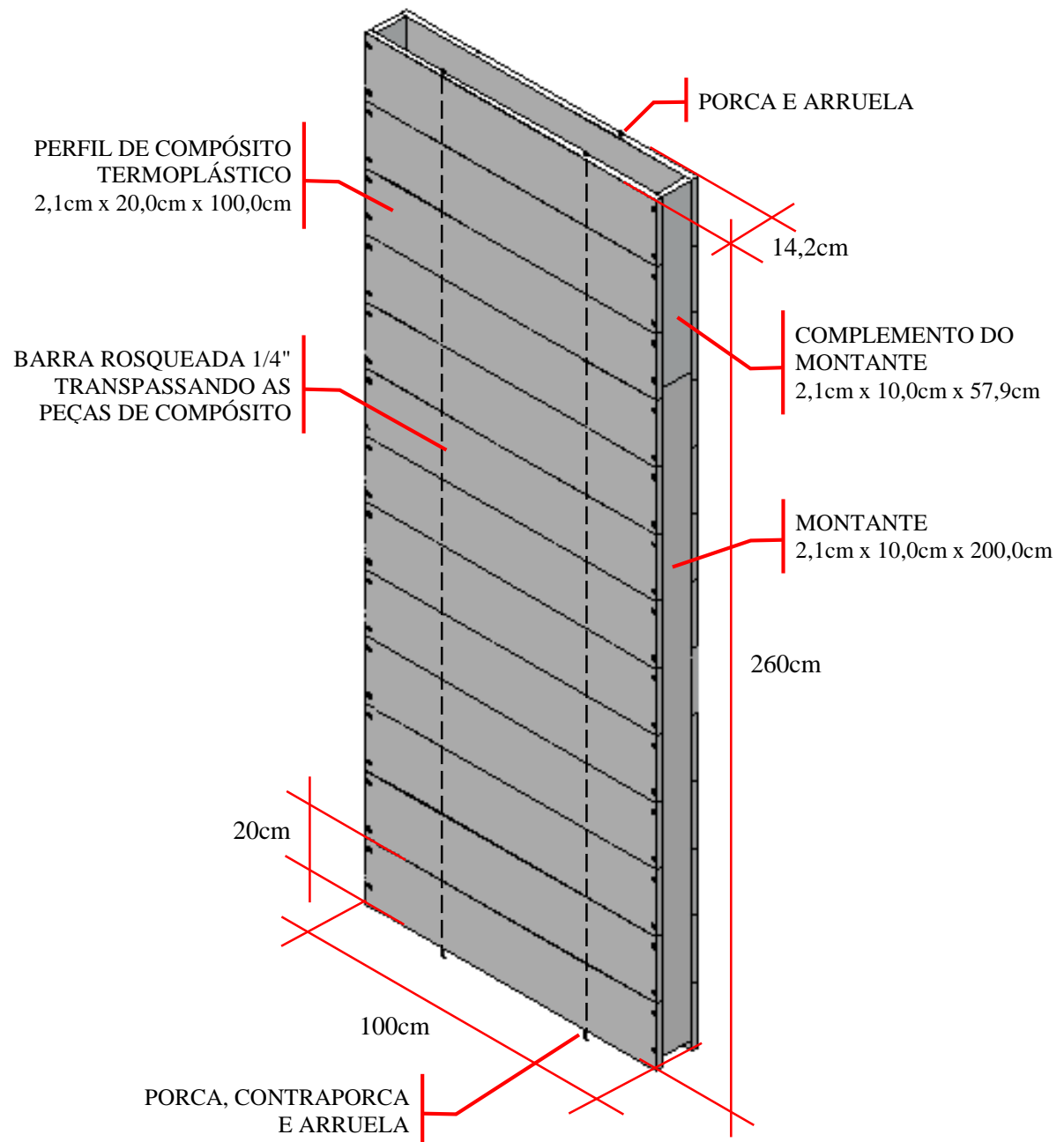


Figura 42: Vista superior com as dimensões e especificações finais do painel. Cotas em centímetros.

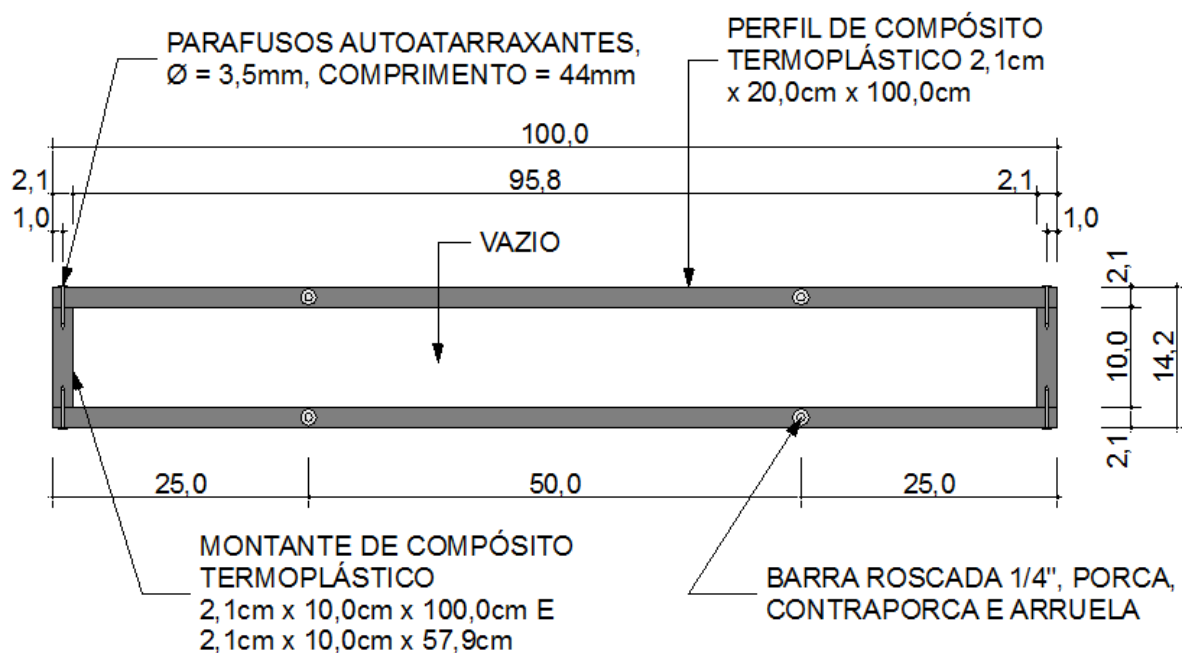
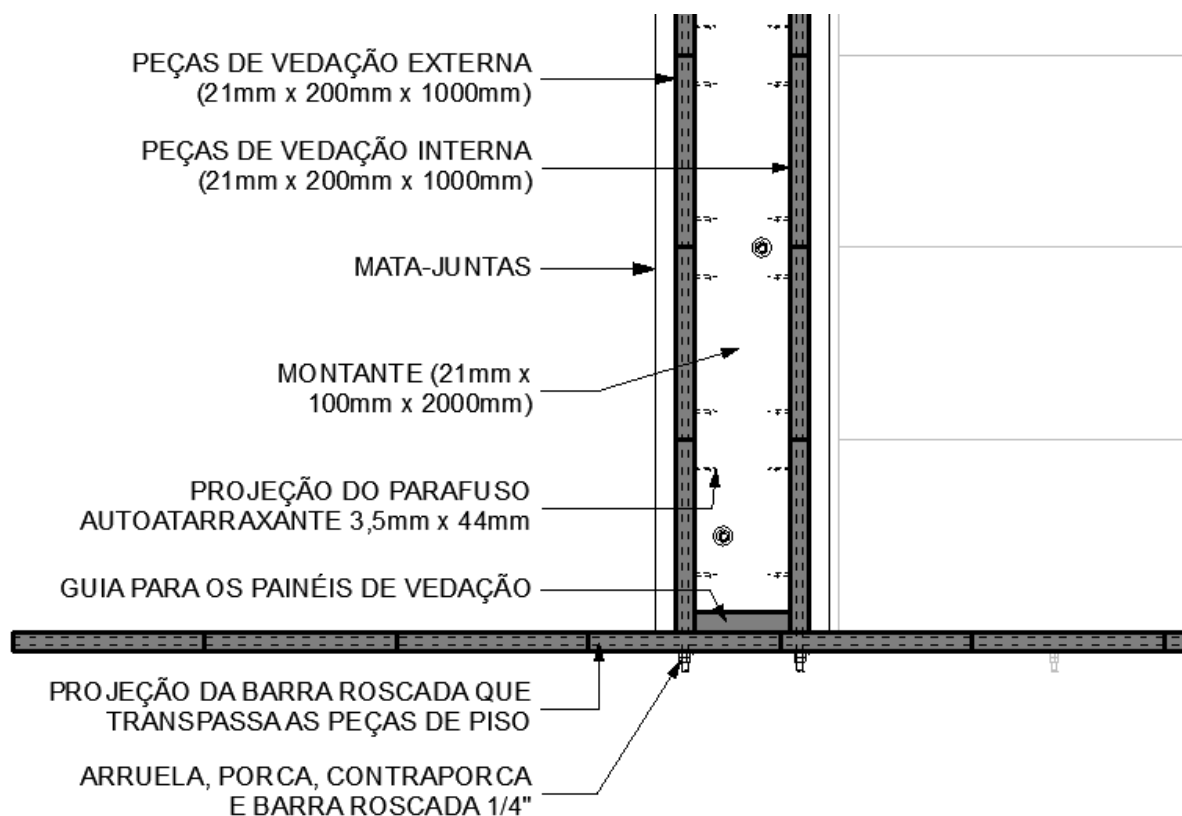


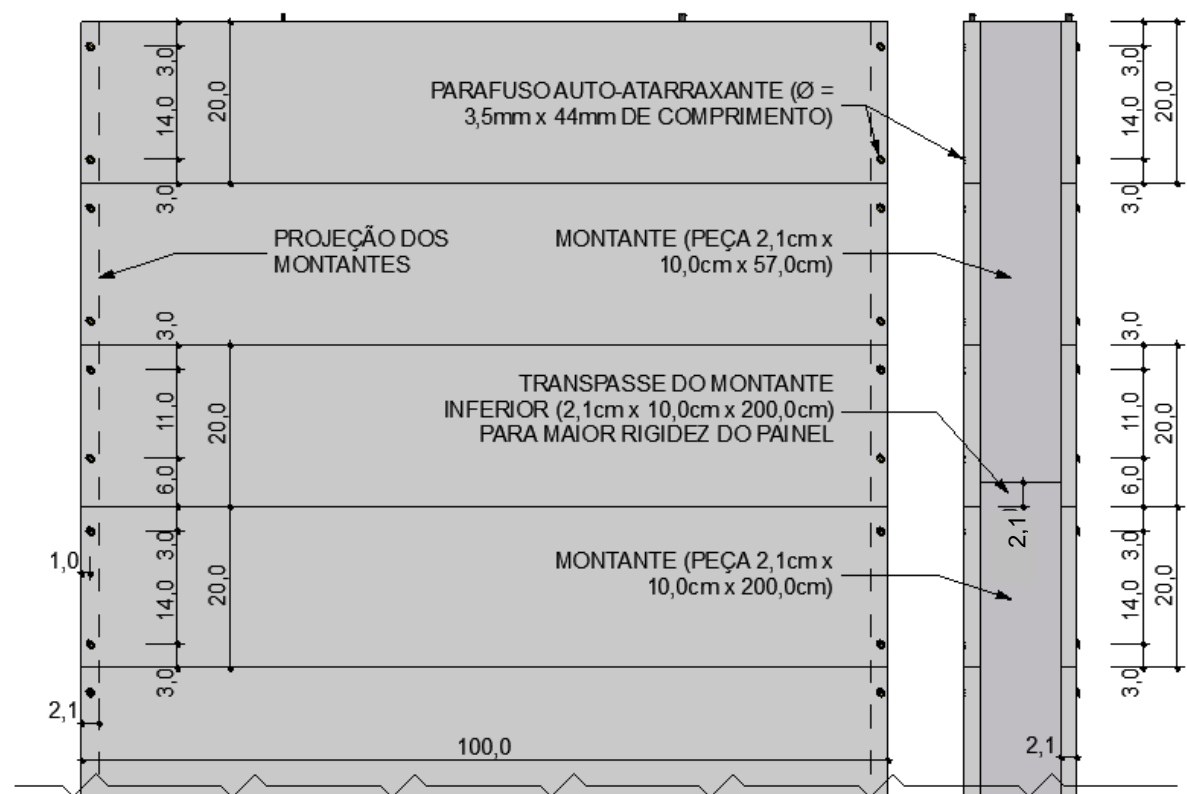
Figura 43: Detalhe de corte longitudinal apresentando a base do painel de vedação encaixado na guia do piso. A imagem exemplifica um painel conectado a um piso tabuado.



Os parafusos autoatarraxantes foram posicionados a 1cm das extremidades das peças, em relação ao seu comprimento (100,0cm), para que assim perfurassem os montantes em aproximadamente metade de sua espessura, já que possuem 2,1cm nessa dimensão. Já em

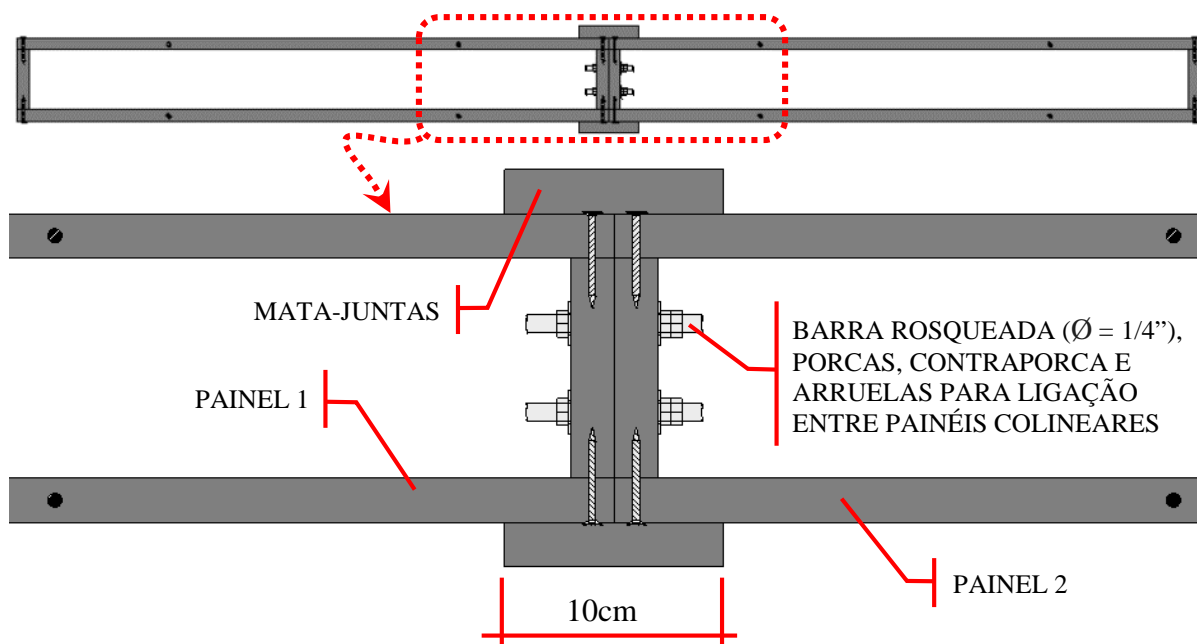
relação à largura das peças (20,0cm), os parafusos foram posicionados a 3cm de suas extremidades. Isso foi repetido para todas as peças, com exceção da 1ª e da antepenúltima (contando-as de baixo para cima), cujos parafusos inferiores ficaram afastados 6cm de sua base. Isso foi feito para que os parafusos não perfurassem os montantes muito próximo das extremidades destes, criando pontos de fragilidade no painel (Figura 44).

Figura 44: Vista frontal e vista lateral da porção superior do painel de vedação. Cotas em centímetros.



Devido aos problemas para ligação entre painéis dos vários tipos de sistema estudados, foi idealizada uma ligação com barras rosqueadas de pequeno comprimento (8cm), porcas, contraporcas e arruelas metálicas para a ligação de painéis colineares (Figura 45). Tais barras rosqueadas podem ser sobras das barras utilizadas para transpassar as peças de compósito, uma vez que elas são fabricadas com 3m de comprimento enquanto os painéis possuem 2,60m de altura.

Figura 45: Corte transversal do sistema de ligação entre 2 painéis colineares.

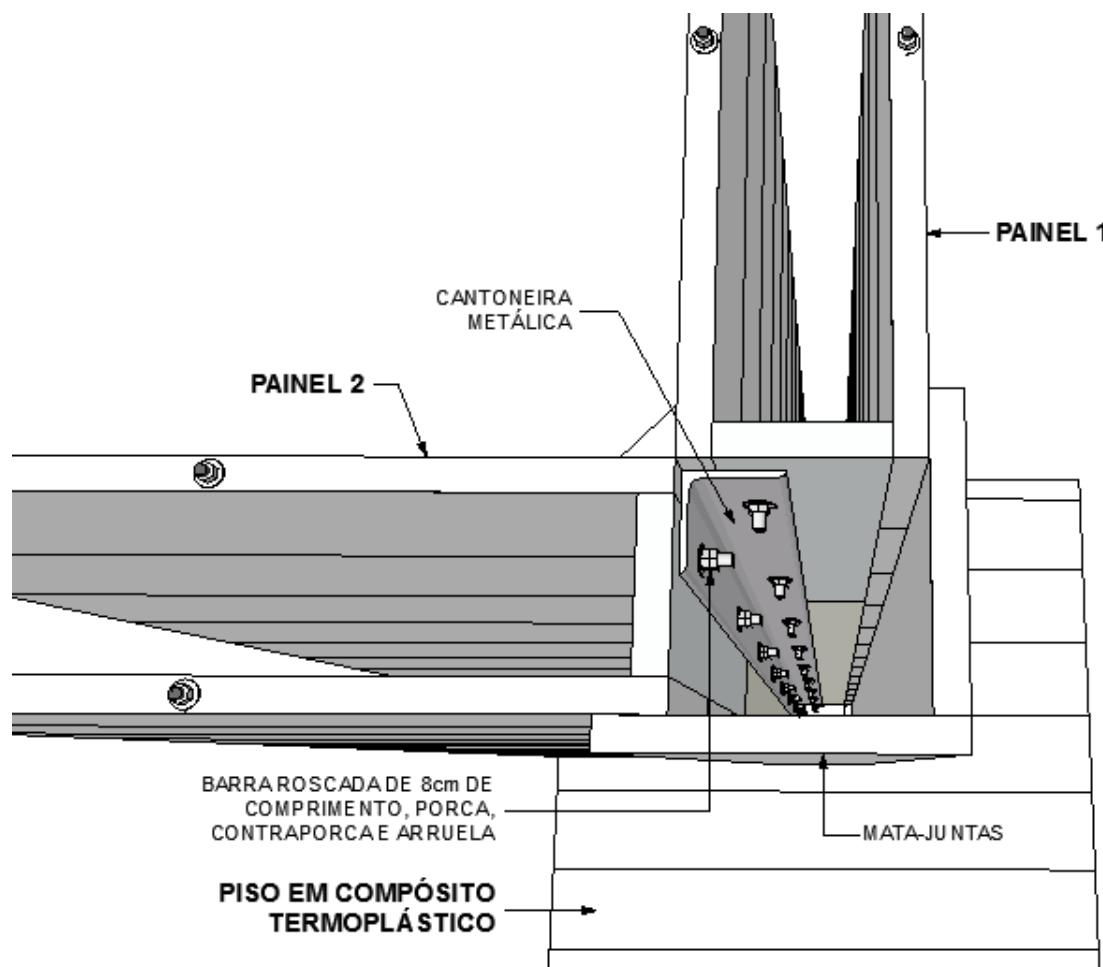


Para ligar painéis perpendiculares entre si, foram utilizados os mesmos componentes usados para ligar painéis colineares, todavia, juntamente com cantoneiras metálicas em aço (Figura 46). Entretanto, foi avaliado que frestas ou falhas nas junções entre eles provavelmente ocorreriam com frequência, devido ao grande número de peças e painéis que estariam envolvidos na montagem de um edifício. Alinhar, tanto na horizontal como na vertical, dezenas de peças e painéis para que não ocorram frestas e para que a edificação apresente estanqueidade e conforto termoacústico, é uma tarefa complexa, uma vez que diferenças de 1mm ou 2mm já são suficientes para a passagem de água, luz e sons.

Deve ser enfatizado que todos os componentes metálicos a serem utilizados nos painéis (barras rosqueadas, parafusos, porcas, arruelas e cantoneiras) deverão ser em aço inoxidável, a fim de resistir à névoa salina intensa existente nas ilhas oceânicas.

Foram previstas peças tipo “mata-juntas” com 10cm para as junções entre painéis colineares, (Figura 45), ou com 20cm de largura para as junções entre painéis perpendiculares entre si (Figura 46). Com isso, anulam-se os eventuais erros de alinhamento ocorridos durante a montagem possibilitando, além da estética do acabamento, o não comprometimento das características termoacústicas e de estanqueidade do sistema construtivo.

Figura 46: Perspectiva mostrando a junção entre painéis perpendiculares feita com cantoneira, parafusos, porcas e arruelas metálicas e mata-juntas em compósito termoplástico.

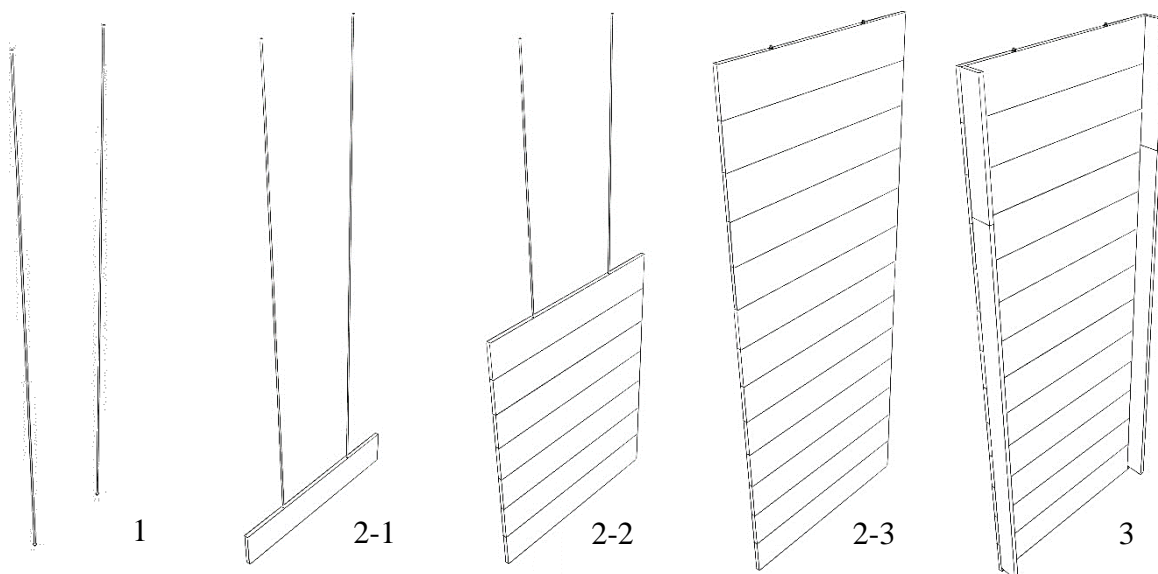


4.2.1 Etapas de montagem

Com o projeto do painel finalizado, foram traçados esquemas para a montagem individual ou para a montagem de uma ou mais vedações formadas por vários painéis (para detalhes, ver Apêndice A). É importante ressaltar que os esquemas de montagem apresentados são alguns dos muitos possíveis.

4.2.1.1 Etapas de montagem de painéis individuais

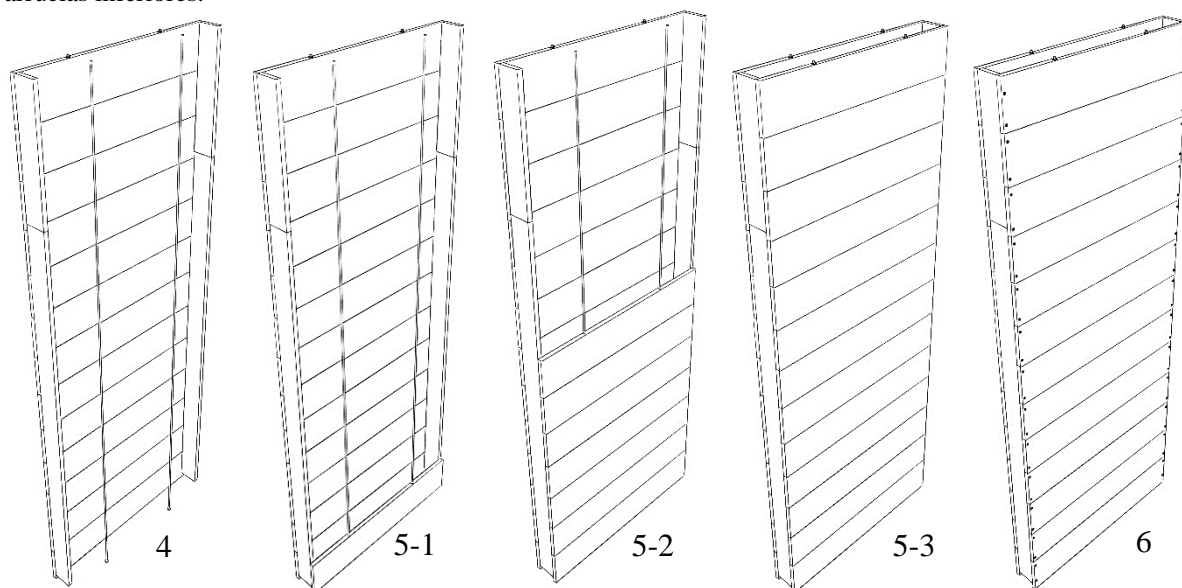
Para uma edificação ser construída com o sistema construtivo projetado neste trabalho, seriam necessários vários painéis de vedação. Nesse sentido, para uma maior resistência mecânica e estabilidade da edificação, eles foram projetados de forma que ficassem solidarizados uns aos outros. Entretanto, apesar do esquema de montagem de uma vedação formada por vários painéis diferir do esquema de montagem de um painel único, este é mostrado para facilitar o entendimento do sistema construtivo. Assim, traçou-se um esquema para a montagem dos painéis individualmente, conforme Figura 47.

Figura 47: Esquema de montagem dos painéis de vedação.

Passo 1:
posicionamento das
barras rosqueadas
da parede externa e
das porcas,
contraporcas e
arruelas inferiores.

Passos 2-1, 2-2 e 2-3: encaixe das peças de 21mm x 200mm x 1000mm (espessura x largura e comprimento) em compósito termoplástico nas barras rosqueadas da parede externa com posterior colocação das porcas e arruelas superiores no passo 2-3.

Passo 3:
aparafusamento das
peças da parede
externa nos
montantes.



Passo 4:
posicionamento das
barras rosqueadas
da parede interna e
das porcas,
contraporcas e
arruelas inferiores.

Passos 5-1, 5-2 e 5-3: encaixe das peças de 21mm x 200mm x 1000mm nas barras rosqueadas da parede interna com posterior colocação das porcas e arruelas superiores no passo 5-3.

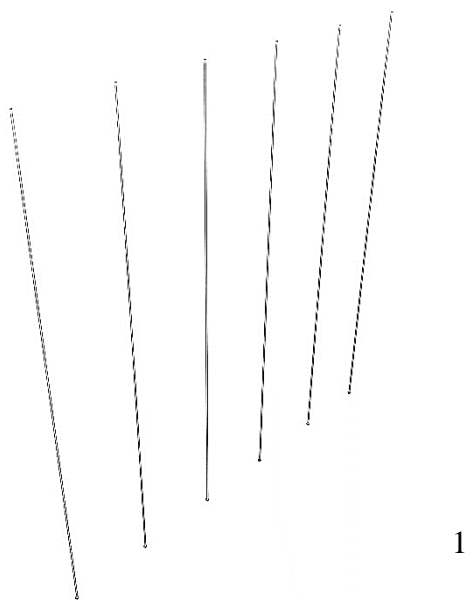
Passo 6:
aparafusamento das
peças da parede
interna nos
montantes.

Ao final do passo 6, as duas paredes (externa e interna) do painel estarão conectadas aos montantes e formando um elemento único.

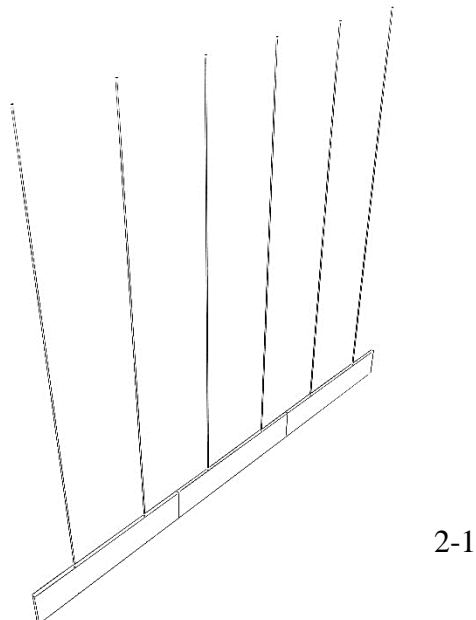
4.2.1.2 Etapas de montagem de vedações formadas por vários painéis colineares

A Figura 48 apresenta os passos sugeridos para a montagem de uma vedação formada por vários painéis colineares.

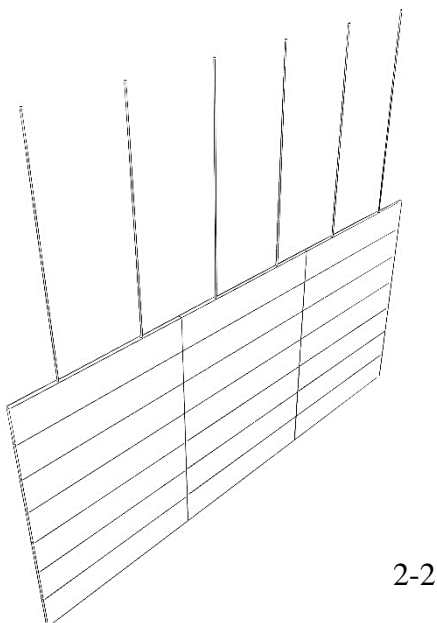
Figura 48: Esquema de montagem de uma vedação formada por vários painéis colineares.



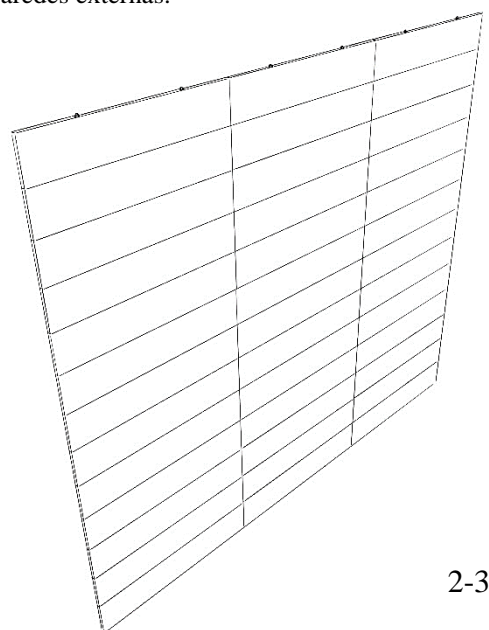
Passo 1: posicionamento das barras rosqueadas da parede externa dos painéis e colocação das porcas, contraporcas e arruelas inferiores.



Passo 2-1: encaixe das peças de 21mm x 200mm x 1000mm (espessura x largura e comprimento) em compósito termoplástico nas barras rosqueadas das paredes externas.



Passo 2-2: encaixe das peças nas barras rosqueadas das paredes externas.

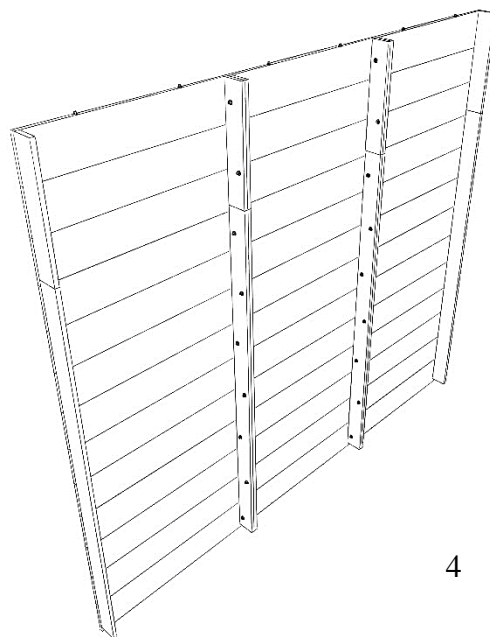


Passo 2-3: encaixe das peças nas barras rosqueadas das paredes externas com posterior colocação e aperto das porcas e arruelas superiores.



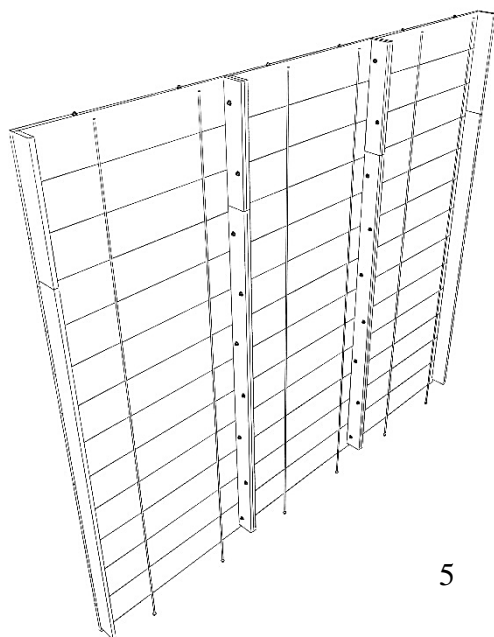
3

Passo 3: aparafusamento das peças das paredes externas nos montantes.



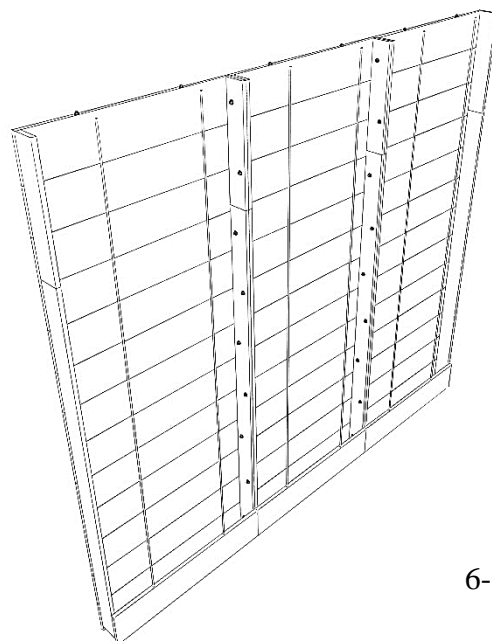
4

Passo 4: ligação dos painéis colineares por meio de barras rosqueadas de 8cm de comprimento, porcas e arruelas conectando seus montantes.



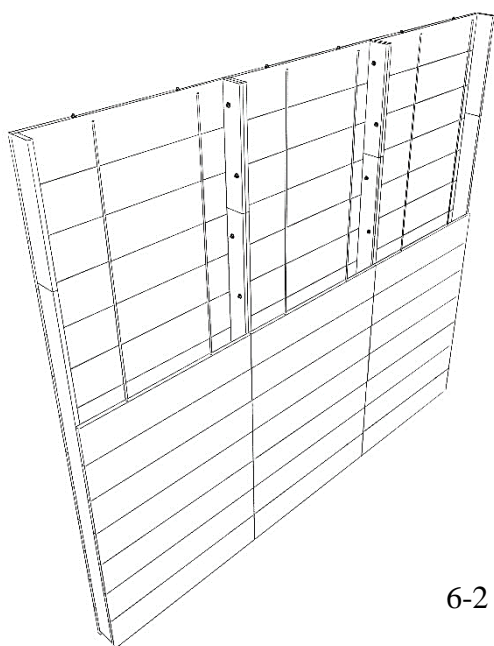
5

Passo 5: posicionamento das barras rosqueadas da parede interna dos painéis e colocação das porcas, contraporcas e arruelas inferiores.



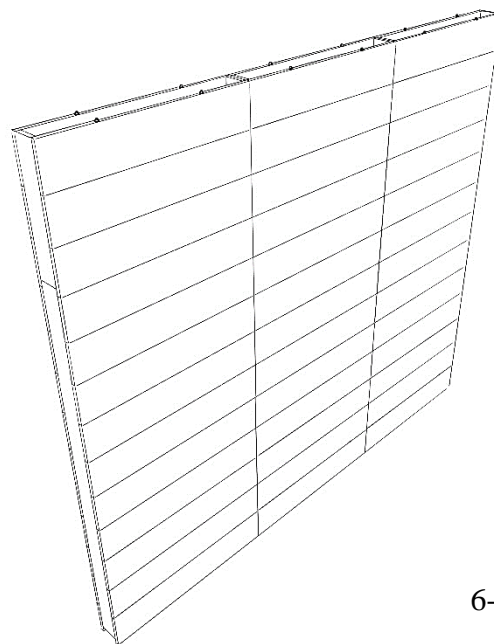
6-1

Passo 6-1: encaixe das peças de 21mm x 200mm x 1000mm nas barras rosqueadas das paredes internas.



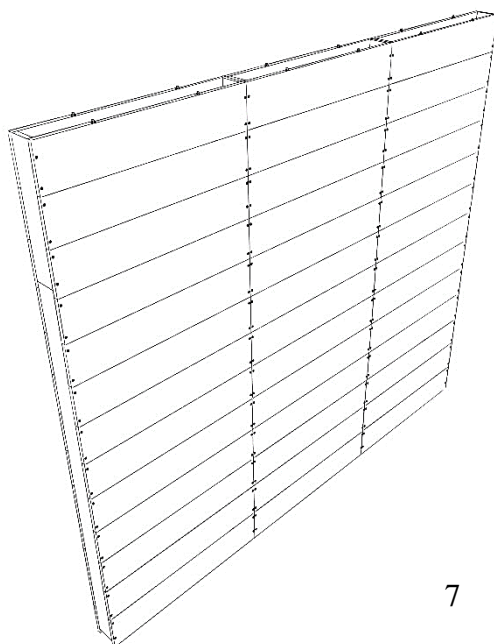
6-2

Passo 6-2: encaixe das peças nas barras rosqueadas das paredes internas.



6-3

Passo 6-3: encaixe das peças nas barras rosqueadas das paredes internas com posterior colocação e aperto das porcas e arruelas superiores.



7

Passo 7: aparafusamento das peças das paredes internas nos montantes.



8

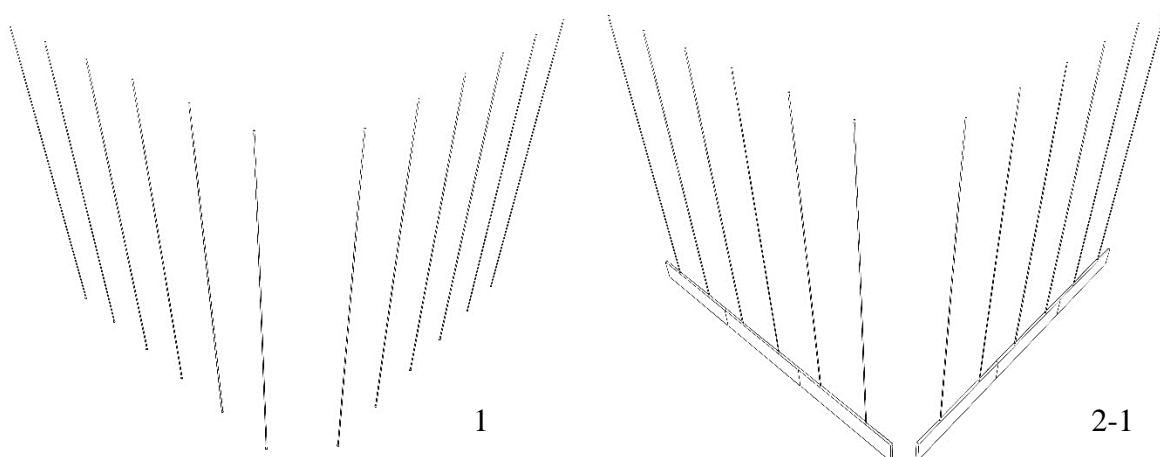
Passo 8: fixação dos mata-juntas nos encontros dos painéis.

Ao final do passo 8, as duas paredes (externa e interna) dos painéis estarão conectadas aos seus respectivos montantes e os montantes dos painéis posicionados lado a lado estarão conectados entre si, formando um elemento único.

4.2.1.3 Etapas de montagem de vedações formadas por painéis perpendiculares entre si

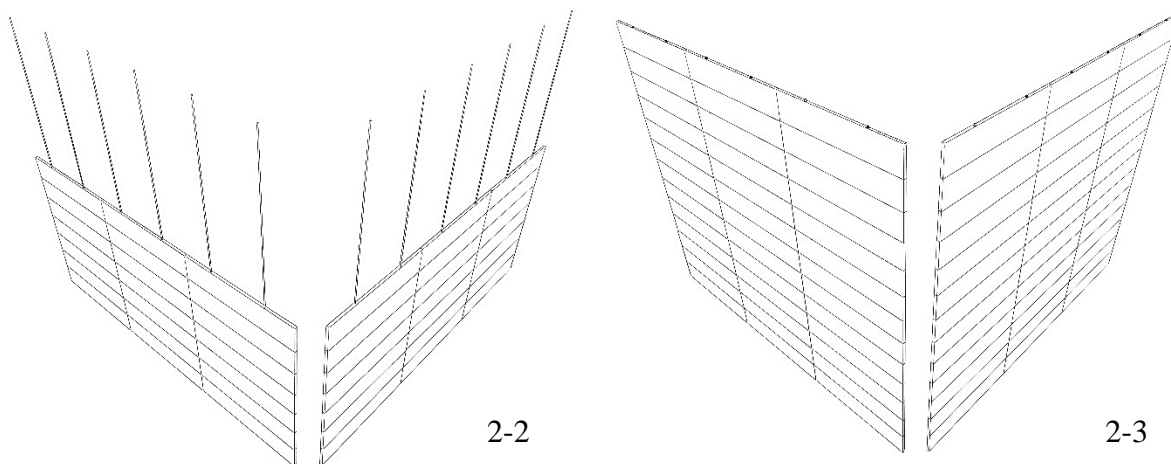
A Figura 49 apresenta os passos a serem seguidos para a montagem de vedações formadas por 2 painéis perpendiculares entre si. A ligação de 3 ou 4 painéis perpendiculares entre si, formando um “T” ou uma cruz, respectivamente, seguirá a mesma sequência de passos que a apresentada neste item.

Figura 49: Esquema de montagem de uma vedação formada por vários painéis perpendiculares entre si.



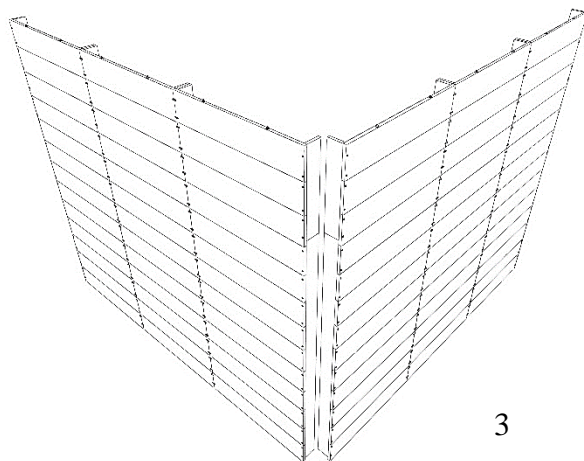
Passo 1: posicionamento das barras rosqueadas da parede externa dos painéis e colocação das porcas, contraporcas e arruelas inferiores.

Passo 2-1: encaixe das peças de 21mm x 200mm x 1000mm (espessura x largura e comprimento) em compósito termoplástico nas barras rosqueadas das paredes externas.



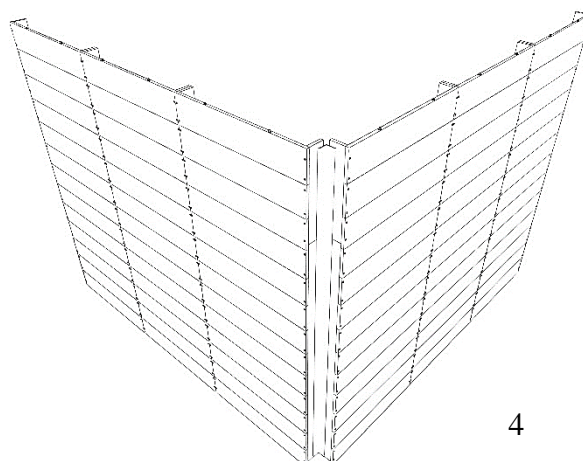
Passo 2-2: encaixe das peças nas barras rosqueadas das paredes externas.

Passo 2-3: encaixe das peças nas barras rosqueadas das paredes externas com posterior colocação e aperto das porcas e arruelas superiores.



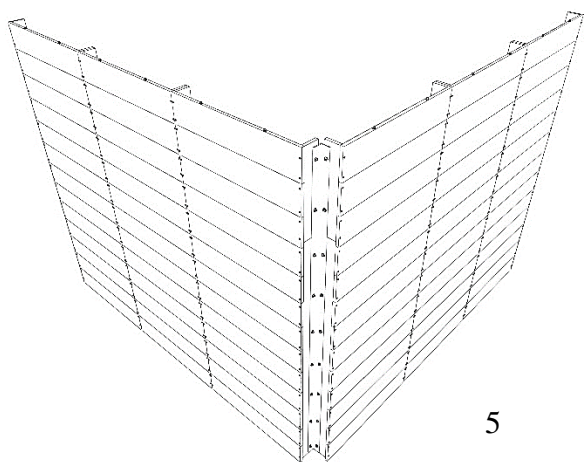
3

Passo 3: parafusagem das peças das paredes externas nos montantes.



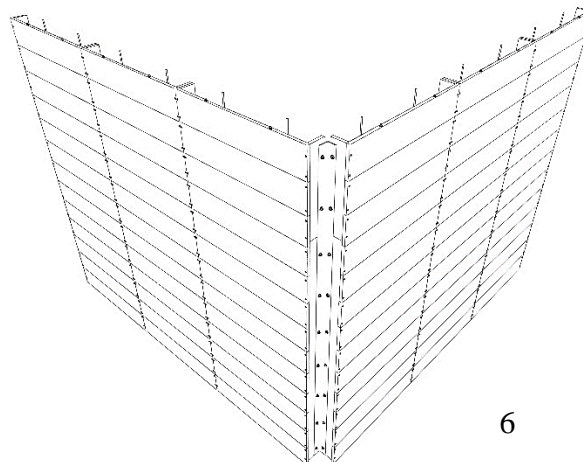
4

Passo 4: posicionamento da cantoneira metálica para ligação dos painéis perpendiculares entre si.



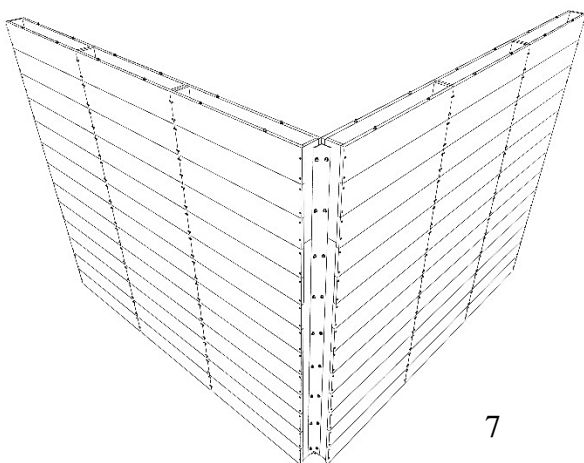
5

Passo 7: ligação dos painéis colineares e perpendiculares por meio da cantoneira e das barras rosqueadas de 8cm de comprimento, porcas e arruelas conectando seus montantes.



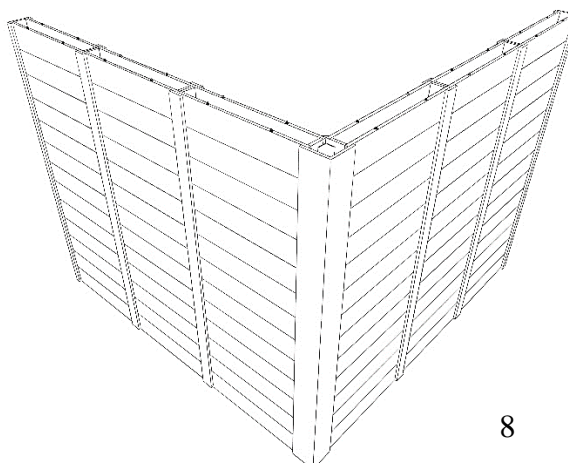
6

Passo 8: posicionamento das barras rosqueadas da parede interna dos painéis. Em seguida, colocação e posicionamento das porcas, contraporcas e arruelas inferiores.



7

Passo 9: encaixe das peças de 21mm x 200mm x 1000mm nas barras rosqueadas das paredes internas com posterior colocação e aperto das porcas e arruelas superiores. Em seguida, aparafusamento das peças das paredes internas nos montantes.



8

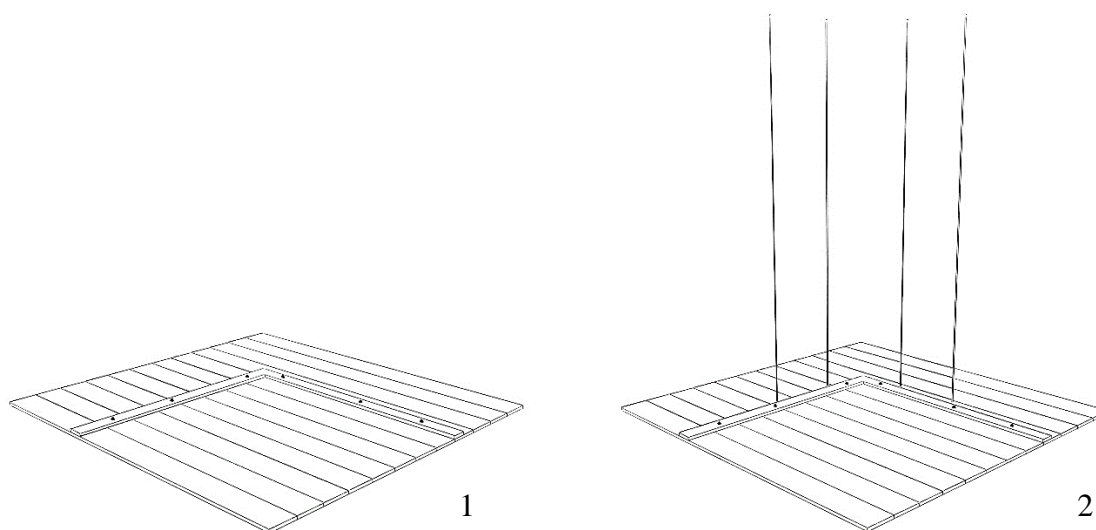
Passo 10: fixação dos mata-juntas nos encontros dos painéis.

Ao final do passo 8, as duas paredes (externa e interna) dos painéis estarão conectadas aos seus respectivos montantes e os montantes dos painéis posicionados perpendicularmente entre si, além dos posicionados lado a lado, estarão conectados um ao outro, formando um elemento único.

4.2.1.4 Etapas de montagem de vedações conectadas ao piso

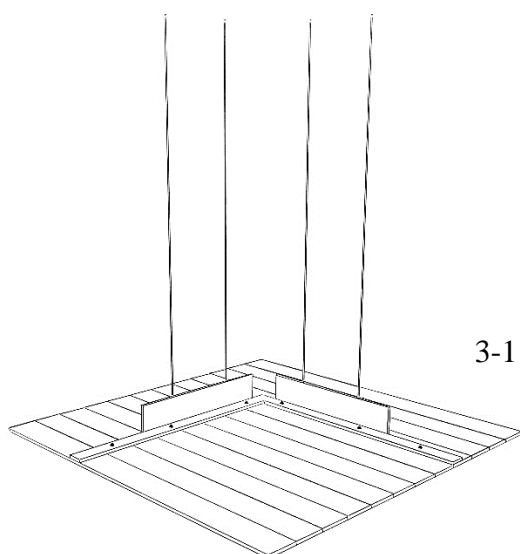
A Figura 50 apresenta os passos sugeridos para a montagem de vedações conectadas ao piso, a fim de que formem um elemento único. O caso apresentado na Figura 50 simula uma peça guia fixada num piso elevado e composto por componentes de menor espessura, como peças de madeira ou mesmo de compósito termoplástico. Para componentes mais espessos e que apresentam maior dificuldade de furação, como uma laje de concreto, uma opção é o chumbamento das barras rosqueadas. Neste caso, dispensar-se-iam as porcas e arruelas inferiores e o aperto das barras rosqueadas seria feito apenas pelas porcas superiores.

Figura 50: Esquema de montagem de vedações conectadas ao piso.

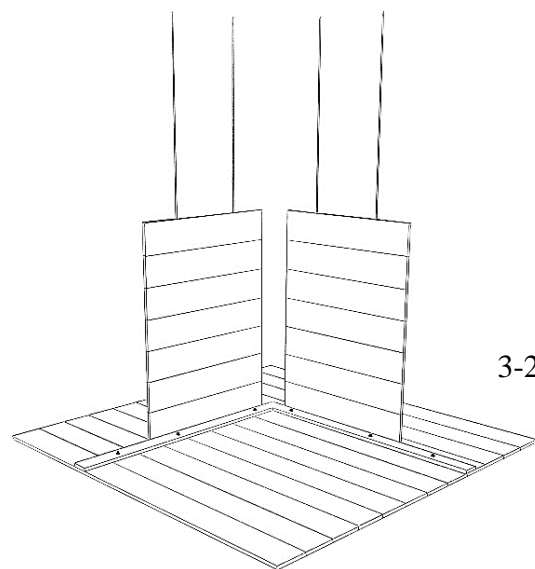


Passo 1: furação do piso para encaixe das barras rosqueadas das paredes externa e interna dos painéis.

Passo 2: posicionamento das barras rosqueadas da parede externa dos painéis e colocação das porcas, contraporcas e arruelas inferiores.



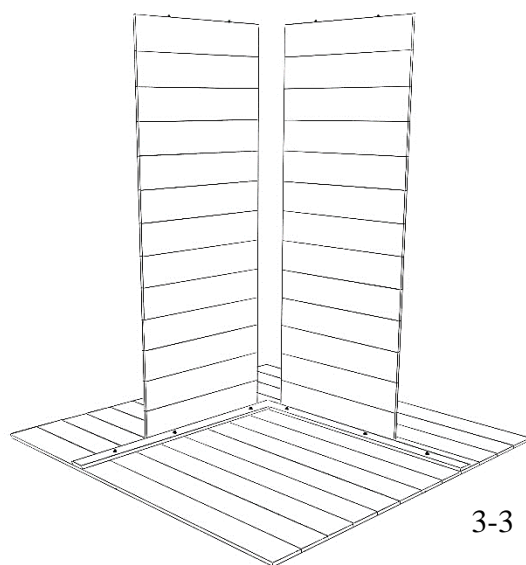
3-1



3-2

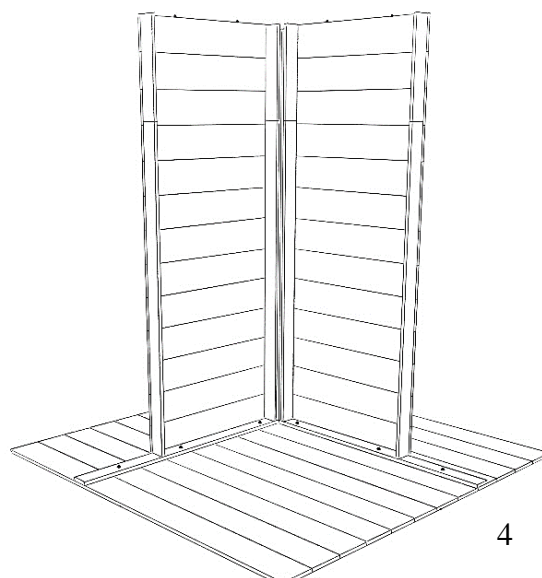
Passo 3-1: encaixe das peças de 21mm x 200mm x 1000mm (espessura x largura e comprimento) nas barras rosqueadas das paredes externas.

Passo 3-2: encaixe das peças nas barras rosqueadas das paredes externas.



3-3

Passo 3-3: encaixe das peças nas barras rosqueadas das paredes externas e posterior colocação e aperto das porcas e arruelas superiores.



4

Passo 4: parafusação das peças das paredes externas nos montantes e posterior posicionamento da cantoneira metálica para ligação dos painéis.

Os passos seguintes são os mesmos que os descritos no item 4.2.1.3, chegando-se ao final da montagem na fixação dos mata-juntas nos encontros dos painéis.

4.2.2 *Quantitativo de materiais para a produção de um ou mais painéis de vedação*

Para produzir um painel de vedação do sistema construtivo idealizado são necessários 5,714m² de compósito termoplástico, além de barras rosqueadas, porcas, arruelas e parafusos, conforme detalhado no Quadro 4.

Quadro 4: Quantitativo de materiais para a produção de um painel de vedação.

Material / Componente	Parte do painel	Quantidade	Quantidade Total
Compósito termoplástico (madeira plástica)	Parede externa	2,6m ²	5,714m ²
	Parede interna	2,6m ²	
	Montantes	0,514m ²	
Barras rosqueadas em aço ($\varnothing = 1/4"$, comprimento = 3m)	Parede externa	2 unidades	4 unidades
	Parede interna	2 unidades	
Porcas em aço ($\varnothing = 1/4"$)	Parede externa	6 unidades: 4 porcas + 2 contraporcas	12 unidades
	Parede interna	6 unidades: 4 porcas + 2 contraporcas	
Arruelas em aço ($\varnothing = 1/4"$)	Parede externa	4 unidades	8 unidades
	Parede interna	4 unidades	
Parafusos autoatarraxantes em aço ($\varnothing = 3,5\text{mm}$, comprimento = 44mm)	Parede externa	52 unidades	104 unidades
	Parede interna	52 unidades	

Já para realizar a junção entre dois painéis de vedação colineares ou perpendiculares são necessários, além dos materiais dos próprios painéis, os materiais e componentes descritos nos Quadros 5 e 6, respectivamente.

Quadro 5: Quantitativo de materiais para a junção entre dois painéis de vedação colineares.

Material / Componente	Parte da junção	Quantidade	Quantidade Total
Compósito termoplástico (madeira plástica)	Mata-juntas externo	0,26m ²	0,52m ²
	Mata-juntas interno	0,26m ²	
Barras rosqueadas em aço ($\varnothing = 1/4"$, comprimento = 0,08m)	Entre montantes dos painéis	9 unidades (0,08m x 9 = 0,72m)	9 unidades (0,08m x 9 = 0,72m)
Porcas em aço ($\varnothing = 1/4"$)	Entre montantes dos painéis:	18 unidades: 9 porcas + 9 contraporcas	27 unidades
	Início da barra	9 unidades	
	Final da barra	9 unidades	
Arruelas em aço ($\varnothing = 1/4"$)	Entre montantes dos painéis:	9 unidades	18 unidades
	Início da barra	9 unidades	
	Final da barra	9 unidades	

Quadro 6: Quantitativo de materiais para a junção entre dois painéis de vedação perpendiculares.

Material / Componente	Parte da junção	Quantidade	Quantidade Total
Compósito termoplástico (madeira plástica)	Mata-juntas externo	1,04m ²	1,041m ²
	Mata-juntas interno	0,0012m ²	

Material / Componente	Parte da junção	Quantidade	Quantidade Total
Cantoneira de aço (espessura da chapa = 4mm, comprimento = 2,54m)	Entre montantes dos painéis	1 unidade	1 unidade
Barras rosqueadas em aço ($\varnothing = 1/4"$, comprimento = 0,06m)	Montante do painel 1 e cantoneira em aço	9 unidades (0,06m x 9 = 0,54m)	18 unidades (0,06m x 18 = 1,08m)
	Montante do painel 2 e cantoneira em aço	9 unidades (0,054m x 9 = 0,486m)	
Porcas em aço ($\varnothing = 1/4"$)	Montante do painel 1 e cantoneira em aço	27 unidades: 18 porcas + 9 contraporcas	54 unidades
	Montante do painel 2 e cantoneira em aço	27 unidades: 18 porcas + 9 contraporcas	
Arruelas em aço ($\varnothing = 1/4"$)	Montante do painel 1 e cantoneira em aço	18 unidades	36 unidades
	Montante do painel 2 e cantoneira em aço	18 unidades	

4.2.3 Massa do painel de vedação

Com base nos materiais e em seu quantitativo, o Quadro 7 apresenta a massa de um painel de vedação e de seus componentes.

Quadro 7: Massa total de um painel de vedação e seus componentes.

Material / Componente	Parte do painel	Quantidade	Quantidade Total	Massa unitária	Massa total
Compósito termoplástico (madeira plástica)	Parede externa	2,6m²	5,714m²	68,031kg	149,512kg
	Parede interna	2,6m²		68,031kg	
	Montantes (x2)	0,514m²		6,404kg (x2)	
Barras rosqueadas em aço (Ø = 1/4", comprimento = 3m)	Parede externa	2 unidades	4 unidades	0,540kg / unidade	2,16kg
	Parede interna	2 unidades			
Porcas em aço (Ø = 1/4")	Parede externa	6 unidades: 4 porcas + 2 contraporcas	12 unidades	0,0034kg / unidade	0,04kg
	Parede interna	6 unidades: 4 porcas + 2 contraporcas			
Arruelas em aço (Ø = 1/4")	Parede externa	4 unidades	8 unidades	0,002kg / unidade	0,016kg
	Parede interna	4 unidades			
Parafusos autoatarraxantes em aço (Ø = 3,5mm, comprimento = 44mm)	Parede externa	52 unidades	104 unidades	0,00238kg / unidade	0,247kg
	Parede interna	52 unidades			
Massa total de um painel de vedação					151,975kg
Peso total de um painel de vedação (massa x gravidade – adotada como 9,80665m/s²)					1490,365N
Massa por m² de um painel de vedação (massa / área do painel (2,6m²))					58,451kg/m²
Peso por m² de um painel de vedação (peso / área do painel (2,6m²))					573,208N/m²

Individualmente, tanto as peças das paredes como a maior peça que forma os montantes possuem a mesma massa, 5,2kg. Ressalta-se que o conhecimento da massa do painel é de fundamental importância para o cálculo estrutural e de fundações, e para o planejamento das etapas de transporte e montagem de uma edificação que venha a adotar o sistema construtivo desenvolvido nesta pesquisa. Com esses dados, pode-se calcular com maior precisão os materiais e as dimensões dos elementos estruturais e de fundações, além do meio de transporte, maquinário e quantidade de operários necessários para erguer um edifício.

5 MONTAGEM DOS PAINÉIS DE VEDAÇÃO DO SISTEMA CONSTRUTIVO

Neste capítulo é mostrada a etapa de montagem efetiva dos painéis de vedação que seriam posteriormente utilizados nos ensaios de laboratório, explicitando-se os problemas e as respectivas soluções adotadas. Tais painéis foram posteriormente utilizados nos ensaios de resistência ao impacto de corpo duro, ao impacto de corpo mole e de compressão.

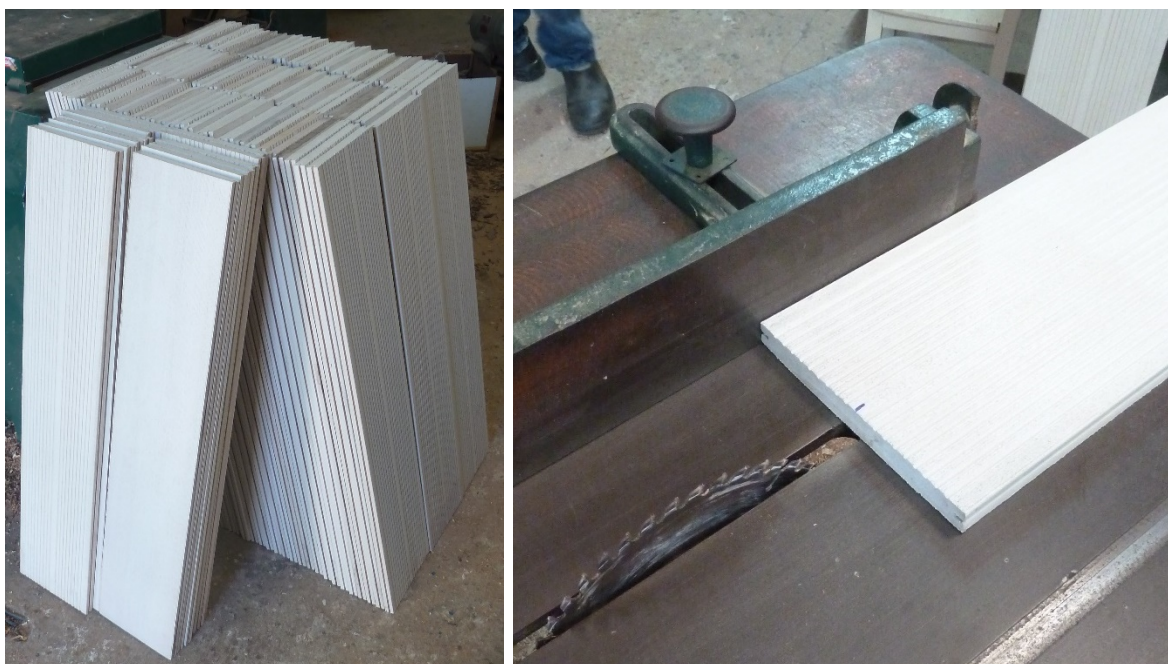
5.1 Preparo das peças de compósito termoplástico

Anteriormente à montagem dos protótipos, as peças de compósito termoplástico tiveram que passar pelas etapas de corte e furação, chamadas aqui de preparo, para que então os protótipos fossem montados. Isso foi feito uma vez que elas são fabricadas nas dimensões 21mm x 200mm x 2000mm (espessura, largura e comprimento), como explicado no item 4.1 e mostrado na Figura 37.

5.1.1 Corte

Para produzir painéis de vedação com 1000mm (1,0m) de largura, as peças foram cortadas ao meio na direção transversal (Figura 51), gerando peças nas dimensões 21mm x 200mm x 1000mm. Além disso, algumas foram cortadas ao meio na direção longitudinal para produzir os montantes no tamanho 21mm x 100mm x 2000mm (Figura 51).

Figura 51: À esquerda, peças de compósito já cortadas transversalmente ao meio e à direita, peça a ser cortada longitudinalmente.



Em seguida, algumas peças cortadas longitudinalmente (21mm x 100mm x 2000mm) foram novamente serradas para produzir peças de 21mm x 100mm x 570mm (Figura 52). Estas foram utilizadas para formar os montantes dos painéis juntamente com as peças inteiriças (21mm x 100mm x 2000mm).

Figura 52: Peça de 21mm x 100mm x 2000mm sendo cortada para produzir peças de 21mm x 100mm x 570mm (espessura x largura x comprimento).



No processo de corte não ocorreram quebras ou deformações do material ou mesmo danos ou superaquecimento da serra. Porém, confirmou-se que alinhar as peças dos painéis de vedação para que fiquem justapostas e sem frestas no momento da construção e montagem é uma tarefa complexa. Observa-se que a dificuldade está, muitas vezes, ligada a falhas decorrentes de quebras no transporte e também a falhas durante a montagem da edificação.

Nesse sentido, foi identificada uma falha causada no momento do corte: antes de serem cortadas as peças possuíam diferenças originárias de fábrica de cerca de 1mm em seu comprimento, ao final dos cortes havia diferenças de até 7mm entre uma peça e outra (Figura 53). Isto provavelmente foi causado por erros na marcação dos pontos onde elas deveriam ser cortadas

e, também, pelo material consumido pela própria espessura da serra, que ao passar pelas peças, retira parte delas.

Figura 53: Diferenças no comprimento das peças de compósito.



O problema identificado foi considerado de pouca importância para o alcance do objetivo da pesquisa, dando-se prosseguimento às etapas de preparação das peças. Assim, os compósitos foram para a etapa de furação.

5.1.2 Furação

Para produzir as peças para a montagem dos painéis de vedação, os compósitos termoplásticos foram perfurados em dois locais – a 250mm e a 750mm do início da peça – ambos para possibilitar a passagem das barras rosqueadas (Figura 42). Os furos foram feitos sempre tomando como referência o início das peças devido às diferenças em seu comprimento causadas por falhas na etapa de corte, conforme anteriormente relatado.

A furação ocorreu na direção da largura das peças de 21mm x 200mm x 1000mm (espessura x largura x comprimento), isto é, na dimensão de 200mm (Figura 54). Como as barras rosqueadas

selecionadas para passar nos furos possuem 1/4" de diâmetro, os furos foram feitos com uma broca com diâmetro imediatamente superior, isto é, 5/16".

Figura 54: Peça de compósito de 21mm x 200mm x 1000mm sendo furada com broca 5/16".



Durante essa etapa não foram encontradas dificuldades, não sendo verificados danos ou superaquecimento da broca, ou mesmo deformação e quebras do material.

5.2 Montagem dos protótipos

Com todos os componentes metálicos (barras rosqueadas de 1/4" com 3m de comprimento, porcas e arruelas) adquiridos e as peças de compósito termoplástico já beneficiadas, iniciou-se a etapa de montagem dos três protótipos.

5.2.1 Encaixe das peças das paredes externa e interna

Seguindo os passos de montagem, as porcas, contraporcas e arruelas inferiores foram posicionadas nas barras rosqueadas (Figura 55) e, em seguida, as peças de compósito foram deslizadas por elas (Figura 56). Por último, as porcas e arruelas superiores foram posicionadas e apertadas, finalizando a montagem da parede externa (Figura 57). O mesmo foi feito para

montar as paredes internas. Ressalta-se que o deslizamento das peças nas barras rosqueadas ocorreu sem dificuldade, o que indicou que a furação foi feita corretamente e que os furos das diferentes peças ficaram todos alinhados uns em relação aos outros.

Figura 55: Porca, contraporca e arruela inferiores posicionadas.



Figura 56: Peça de compósito sendo deslizada pelas barras rosqueadas.



Figura 57: Parede externa do painel de vedação finalizada.



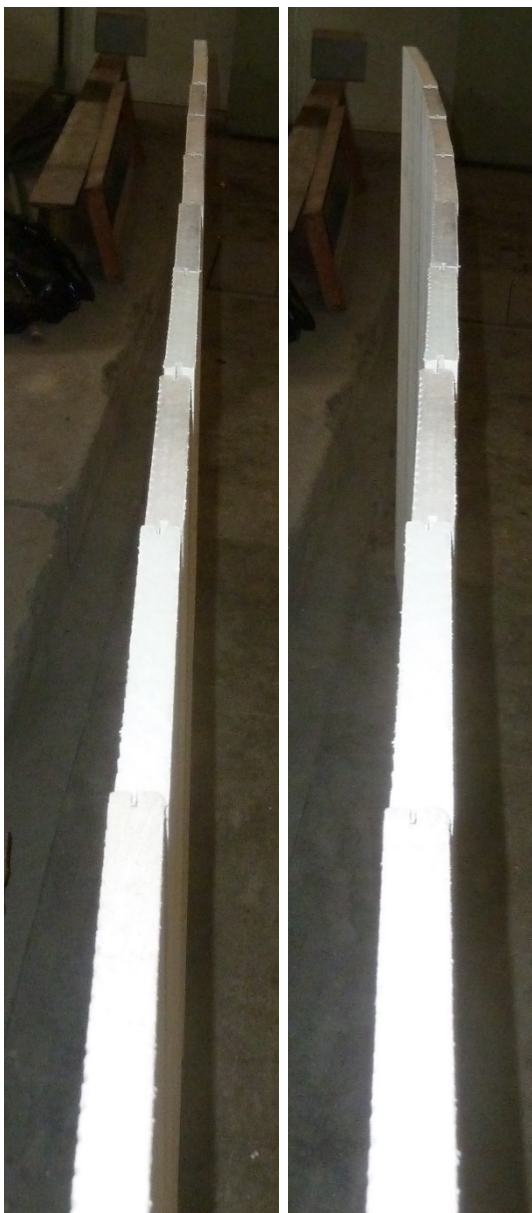
Em função das desigualdades no comprimento das peças comentadas anteriormente, e pelo fato da furação ter tido como referência sempre o mesmo lado das peças, foram observadas diferenças em seu alinhamento em cerca de 1mm de um lado, enquanto na outra lateral as diferenças chegaram a cerca de 7mm (Figura 58).

Figura 58: Lateral da parede externa com peças desalinhadas (à esquerda) e diferença de cerca de 7mm no alinhamento entre duas delas (à direita).



Além disso, após um determinado ponto, conforme as porcas eram apertadas e as peças que formavam a parede eram comprimidas, esta começava a apresentar uma curvatura decorrente do processo de flambagem (Figura 59). Com isso, o aperto das porcas foi feito até o ponto no qual observava-se que as peças da parede se movimentavam relativamente juntas, formando um único elemento, e até que ficassem comprimidas o suficiente para não apresentar nenhuma fresta. No entanto, quando tais pontos eram alcançados, as paredes invariavelmente apresentavam deformação por flambagem. Todavia, pensou-se que, quando as paredes fossem parafusadas aos montantes, os parafusos empregariam força suficiente para suprimir tal deformação. A existência das saliências nas bordas dos perfis pode ter contribuído para a ocorrência desse fenômeno, uma vez que elas reduzem consideravelmente a superfície de apoio e contato entre as peças.

Figura 59: À esquerda, parede sem curvatura aparente e, à direita, parede com curvatura causada por flambagem devida ao aperto das porcas metálicas.



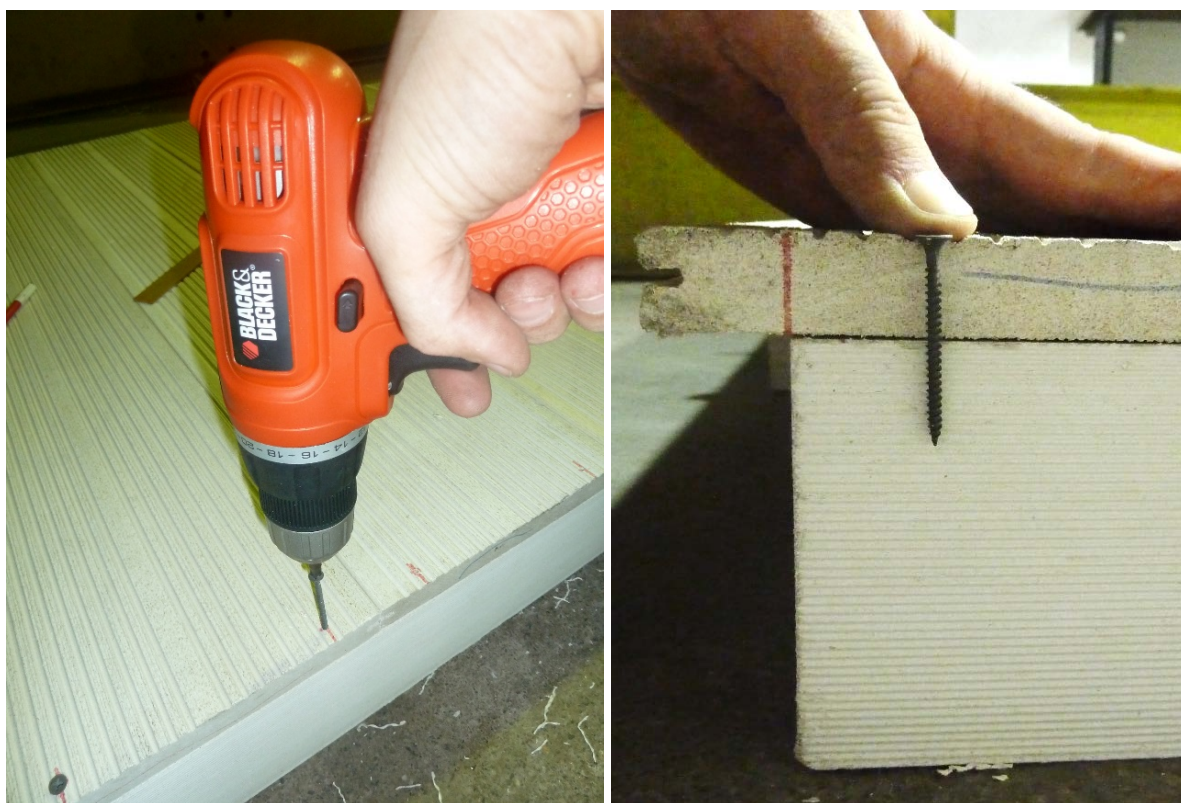
5.2.2 Aparafusamento das peças das paredes externa e interna nos montantes

Com a parede externa do painel pronta, os montantes foram nela aparafusados. Como a montagem foi realizada no chão, os montantes foram posicionados sobre este. Em seguida a parede externa foi colocada sobre os montantes. A marcação dos pontos onde os parafusos seriam fixados foi feita (Figura 60), prosseguindo-se com o aparafusamento das peças com parafuradeira elétrica modelo Black & Decker GC1200M (Figura 61). Os parafusos penetravam os montantes em aproximadamente 22mm, ou seja, a metade de seu comprimento (Figura 61).

Figura 60: Marcação dos locais de aparafusamento.



Figura 61: À esquerda, processo de aparafusamento, e à direita, imagem mostrando o comprimento do parafuso que penetra nos montantes.



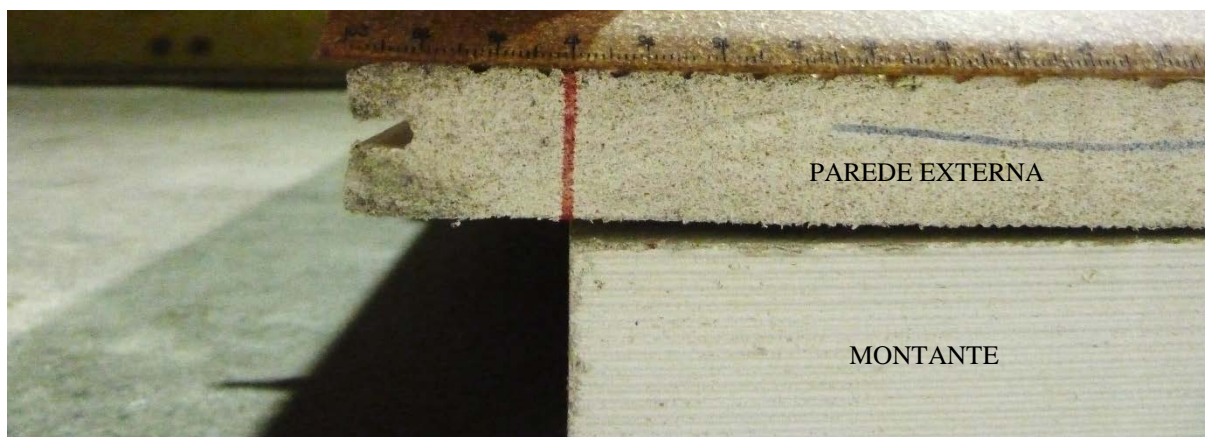
Após os montantes serem aparafusados à parede externa, todo o conjunto foi rotacionado de modo que os montantes ficassem voltados para cima (Figura 62). Em seguida a parede interna foi posicionada sobre o conjunto e aparafusada, concluindo a montagem do painel.

Figura 62: Conjunto (parede externa parafusada aos montantes) já rotacionado e parede interna prestes a ser posicionada sobre os montantes para aparafusamento.



Como relatado no item 5.2.1, conforme as paredes eram apertadas ocorria sua flambagem. A Figura 63 mostra a curvatura de uma parede e a fresta existente entre a sua extremidade e o montante anteriormente ao aparafusamento. Com o aparafusamento das peças da parede no montante, tanto a deformação como a fresta foram suprimidas pela força aplicada pelos parafusos.

Figura 63: Fresta entre o montante e a extremidade da parede externa.



Um fenômeno observado durante o aparafusamento foi que, quase invariavelmente, quando os parafusos perfuravam as peças da parede e começavam a perfurar os montantes, aquelas tendiam a se afastar destes, mesmo sendo aplicada muita força no sentido contrário (Figura 64). Com isso, após os aparafusamentos, por vezes havia frestas com cerca de 1mm ou 2mm entre as peças da parede e os montantes (Figura 65). Excetuando tal problema, não houve contratempos durante a etapa de aparafusamento.

Figura 64: Aplicação do peso do corpo para tentar impedir que as peças da parede se afastassem dos montantes no momento da aparafusamento.



Figura 65: Frestas com cerca de 1mm a 2mm ocorridas no aparafusamento.



5.2.3 Comentários sobre a montagem

Os passos descritos em 5.2.1 e 5.2.2 foram repetidos para a montagem dos três protótipos, produzindo três painéis de vedação iguais. A Figura 66 mostra os três protótipos concluídos e prontos para serem utilizados nos ensaios mecânicos.

Figura 66: Os três protótipos concluídos.



O processo de montagem dos painéis foi realizado pelo autor deste trabalho, o que demonstra que podem ser construídos por uma só pessoa. Seu deslocamento e posicionamento na área onde foi montado foi realizado com alguma dificuldade devido à elevada massa que possuem (cerca de 152kg). A necessidade de mais pessoas e equipamentos – como talhas manuais e técnicos do laboratório –, ocorreu no período de preparação e execução dos ensaios mecânicos, uma vez que os painéis precisaram ser posicionados de forma adequada. Porém, deve ser considerado que o deslocamento de painéis prontos foi necessário somente para o teste do sistema, já que eles foram desenvolvidos para serem montados no local da obra. Tendo isso em vista, uma única pessoa é capaz de realizar os deslocamentos das peças e a montagem dos painéis numa situação real.

É importante enfatizar que os painéis feitos para os ensaios foram montados no chão. Todavia, na prática eles serão montados já na vertical, como mostrado no item 4.2.1. Isso pode tornar necessário o uso de escoras para equilibrar o painel enquanto a montagem não é finalizada.

O tempo de montagem de cada painel, ou seja, para a execução das etapas descritas nos itens 5.2.1 e 5.2.2, e excluindo as etapas de preparação das peças, foi de aproximadamente 5 horas. Porém, vale ressaltar que nessas 5 horas também está incluso o tempo gasto para fotografar todo o processo de montagem e para anotar os problemas ocorridos e as soluções adotadas para resolvê-los. Assim, é possível inferir que para uma construção real, o tempo de montagem de

cada painel poderia ser reduzido em cerca de 30 minutos. Além disso, numa situação na qual muitos painéis seriam montados, certas etapas poderiam ser otimizadas por meio de soluções simples, como o uso de um gabarito para a marcação dos pontos onde as peças de compósito deveriam ser aparafusadas. Como para esta pesquisa foram produzidos apenas 3 painéis, tal marcação foi feita peça a peça com uma régua (Figura 60).

6 PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Após a montagem dos três painéis de vedação, iniciou-se a preparação dos ensaios mecânicos. Inicialmente, os protótipos foram identificados como CP 1, CP 2 e CP 3, e o primeiro protótipo (CP 1) foi posicionado na estrutura metálica rígida (quadro rígido) existente no interior do Laboratório de Estruturas (LEST) da UFES. Tal estrutura foi utilizada como suporte para a realização dos três ensaios.

A NBR 15575-2 e a NBR 15575-4 colocam que quando sistemas inovadores forem testados, as condições dos testes devem simular exatamente as condições reais às quais o sistema construtivo estaria submetido. No caso deste estudo, o painel de vedação desenvolvido foi projetado para ser parafusado ou chumbado ao piso e parafusado à cobertura, configurando um engaste no topo e em sua base, formando um elemento único (vedações + piso + cobertura) que trabalhasse conjuntamente contra os esforços. Assim, o topo e a base dos painéis foram engastados na estrutura metálica rígida a fim de simular as condições reais de uso (Figura 67). Entretanto, o engaste realizado na base dos protótipos para a execução dos ensaios mecânicos difere em parte daquele que aconteceria na realidade, uma vez que neste caso, os painéis teriam apenas a sua superfície inferior parafusada e em contato com outros elementos. No caso do engaste simulado no ensaio, além de sua superfície inferior, o painel de vedação teve cerca de 19cm, em relação à sua altura, abraçado pelas vigas do quadro rígido (Figura 67). Isso foi feito para que o cilindro hidráulico necessário aos ensaios de compressão pudesse ser posicionado sobre o painel e sob a viga superior do quadro rígido. Caso o painel fosse locado num nível mais alto, o cilindro hidráulico não caberia no espaço restante (Figura 67).

Por outro lado, a forma de teste dos protótipos mensurou a resistência e o comportamento mecânico de apenas um painel por vez. Numa situação real, ele estaria conectado a outros em suas duas laterais, como apresentado no item 4.2.1, fazendo com que todo o conjunto trabalhasse contra os esforços mecânicos e tornando-os mais rígidos contra as deformações. Desse modo, os ensaios realizados simularam a pior situação, ou seja, aquela na qual apenas um painel teria que resistir a todos os tipos de cargas.

A sequência de ensaios em cada protótipo foi a seguinte: ensaio de resistência ao impacto de corpo duro, seguido do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole e, finalmente, o ensaio de resistência à compressão. Essa ordem foi mantida para os três protótipos testados.

Figura 67: Posicionamento do protótipo no quadro rígido. À direita, detalhe do engaste na base do painel.



6.1 Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro

Para a execução do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro foram utilizadas duas esferas de aço, sendo uma com 0,5 kg e outra com 1,0kg (Figura 68), e um paquímetro com resolução de 0,02mm para a medição das mossa e deformações (Figura 69), conforme recomenda a NBR 11675 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1990).

Figura 68: Esfera de 0,5kg (à esquerda) e de 1,0kg (à direita) utilizadas no ensaio.



Figura 69: Paquímetro com resolução de 0,02mm utilizado no ensaio.



Posteriormente, as esferas foram presas num cabo de aço e seus centros foram alinhados ao centro do painel posicionado na estrutura metálica rígida (Figura 70). Em seguida, o ensaio foi realizado, sendo os pontos no qual ambas as esferas impactaram definidos de forma aleatória e abrangendo toda a largura do painel.

Figura 70: Esfera de aço de 0,5kg (à esquerda) e de 1,0kg (à direita) alinhadas ao centro do painel.



O ensaio seguiu o recomendado nas NBR 11675, NBR 15575-2 e NBR 15575-4. Para tanto, as exigências e informações requeridas pelas três normas foram agrupadas no Quadro 8.

Quadro 8: Exigências e informações das normas brasileiras referentes ao ensaio de resistência ao impacto de corpo duro.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO									
Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura*	Mossas		Observação visual				Observações
			Ocorrência	Profundidade	Ruína/Falha	Fissura	Destacamento	Outros	
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 0,50m							
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 0,75m							
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 1,00m							
10	Esfera de aço 1kg	h = 1,00m							
10	Esfera de aço 1kg	h = 2,00m							
10	Esfera de aço 1kg	h = 3,00m							

* A altura “h” apresentada é a altura da qual o corpo percussor de impacto deverá ser abandonado em queda livre e é medida em relação ao centro do corpo de prova.

Ao longo do ensaio as informações eram registradas seguindo o exposto no Quadro 8 até que fosse executado o último impacto.

6.2 Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole

Para a execução do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole, 40kg de mistura de areia seca com serragem (Figura 71) foram inseridos num saco cilíndrico de couro com 350mm de diâmetro e 900mm de altura (Figura 72), conforme a NBR 11675.

Figura 71: Areia (à esquerda) e serragem (à direita) inseridos no saco de couro.



Figura 72: Saco de couro com 40kg de mistura de areia e serragem.



Posteriormente, o saco foi preso num cabo de aço e seu centro foi alinhado ao centro do painel posicionado na estrutura metálica rígida (Figura 73). Na face oposta à qual o saco impactaria foi fixado o dispositivo descrito na NBR 11675 a fim de registrar os deslocamentos horizontais sofridos pelo painel com os impactos (Figura 73). Sob este foi posicionada uma folha milimetrada (Figura 73) e, em seguida, o ensaio foi realizado.

Figura 73: Saco de couro alinhado ao centro do painel (à esquerda) e dispositivo para a medição dos deslocamentos horizontais (à direita).



A execução do ensaio seguiu o descrito nas NBR 11675 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1990), NBR 15575-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a) e NBR 15575-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b). Para tanto, as exigências e informações requeridas pelas três normas foram agrupadas no Quadro 9.

Quadro 9: Exigências e informações das normas brasileiras referentes ao ensaio de resistência ao impacto de corpo mole.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE									
Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura ¹	Deslocamento		Observação visual				Observações
			Máximo	Residual	Ruína/Falha	Fissura	Destacamento	Outros	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,30m							
1	Saco de couro 40kg	h = 0,45m							
1	Saco de couro 40kg	h = 0,60m							
1	Saco de couro 40kg	h = 0,90m							
1	Saco de couro 40kg	h = 1,20m							
1	Saco de couro 40kg	h = 1,80m							
1	Saco de couro 40kg	h = 2,40m ²							

¹ A altura “h” apresentada é a altura da qual o corpo percussor de impacto deverá ser abandonado em queda livre e é medida em relação ao centro do corpo de prova.

² O abandono do saco de couro da altura de 2,40m é exigida pela NBR 15575-4 apenas para sistemas construtivos a serem utilizados em edifícios com dois pavimentos ou mais. Para sistemas construtivos a serem utilizados em edifícios térreos (caso do sistema desenvolvido neste trabalho), a altura máxima de abandono do saco de couro exigida pela NBR 15575-4 é 1,80m.

Ao longo do ensaio as informações eram registradas seguindo o exposto no Quadro 9 até que fosse executado o último impacto.

6.3 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão utilizou para a aplicação de carga nos protótipos um conjunto hidráulico formado por uma bomba hidráulica com manômetro (Figura 74) e um cilindro hidráulico com capacidade de aplicação de carga igual a 20 toneladas (Figura 75). O conjunto é da marca Nowak, modelo CJ 20. O manômetro da bomba hidráulica está graduado em duas unidades: psi e kg/cm² (Figura 75).

Figura 74: Bomba hidráulica utilizada no ensaio de compressão. É possível ver à direita o manômetro que indica a carga aplicada.



Figura 75: À esquerda, manômetro da bomba hidráulica; à direita, cilindro hidráulico utilizado.



Já para a medição dos deslocamentos vertical e horizontal dos painéis foram utilizados 3 relógios comparadores digitais com precisão de centésimo de milímetro da marca Mitutoyo, modelo Absolute ID-U (Figura 76). Um deles foi instalado no topo do painel (Figura 77) e, conforme a carga era aplicada pelo conjunto hidráulico, era feita a medição do deslocamento vertical. Os outros dois foram posicionados de modo a medir o deslocamento causado por

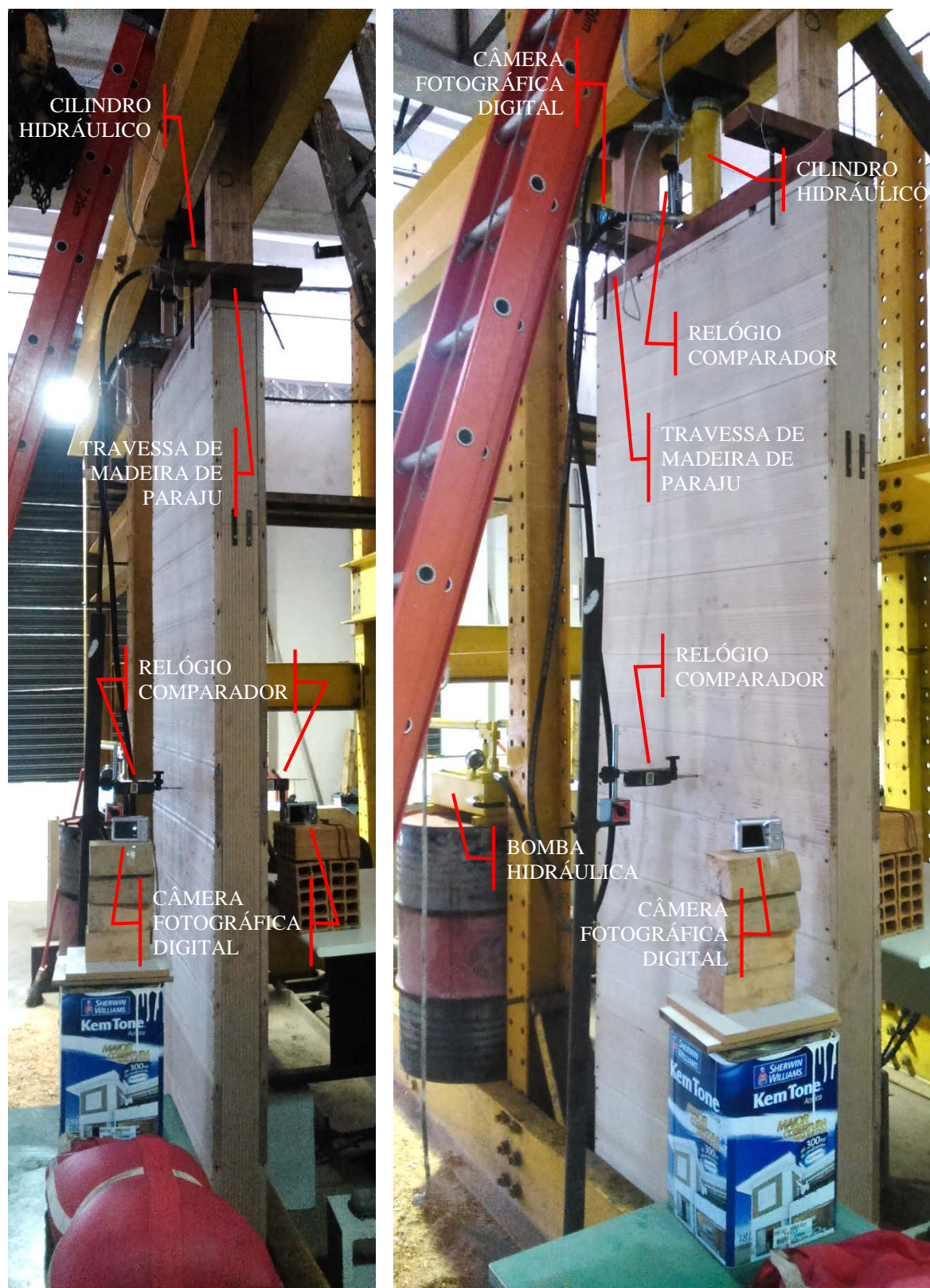
flambagem, sendo um para cada lado do painel (Figura 77), já que não se consegue prever em qual sentido ela ocorrerá.

Figura 76: Relógio comparador utilizado. Foram empregados 3 semelhantes.



Como o sistema de aquisição de dados existente no Laboratório de Estruturas não estava pronto para uso, a fim de traçar o diagrama Carga x Deslocamento dos painéis, foram instaladas câmeras fotográficas digitais filmando todo o ensaio e a variação de carga e de deslocamento indicadas no manômetro da bomba hidráulica e nos relógios comparadores, respectivamente (Figura 77). Posteriormente foi feita a sincronização dos vídeos chegando-se à variação do deslocamento em relação à variação da carga aplicada para cada segundo de vídeo. Com isso, foram necessárias 5 câmeras fotográficas digitais, 3 para filmar os relógios comparadores (uma para cada um), uma para o manômetro da bomba hidráulica e uma para filmar todo o ensaio.

Figura 77: Protótipo e equipamentos posicionados e prontos para o início do ensaio de compressão. As imagens mostram a localização de cada elemento empregado no ensaio.



Para que a carga se distribuisse uniformemente ao longo da seção transversal do painel, foi posicionada sobre ele uma peça em compósito termoplástico com 2,1cm x 14,5cm x 100cm

(altura x largura x comprimento) com recortes para a passagem das porcas, arruelas e da ponta superior das barras rosqueadas. Sobre esta e sob o cilindro hidráulico foi colocada uma travessa de madeira de Paraju nas dimensões 7cm x 14,5cm x 105cm (altura x largura x comprimento), conforme Figura 78. Inicialmente tentou-se utilizar uma viga de aço com seção “T” para cumprir tal função, por ser menos deformável, entretanto, a altura existente para o posicionamento do cilindro hidráulico não era suficiente para que esta fosse empregada (ver item 6 e Figura 67).

Figura 78: Peça de madeira de Paraju e de compósito termoplástico utilizadas para distribuir a carga aplicada pelo cilindro hidráulico.



A execução do ensaio seguiu o descrito na NBR 15575-2. A norma coloca que para elementos estruturais comprimidos (caso do sistema construtivo desenvolvido nesta pesquisa), as cargas devem ser aplicadas com excentricidade dada pela Equação (1):

$$\frac{t}{30} \geq 1cm \quad (1)$$

Onde “t” é igual à menor dimensão do elemento estrutural (normalmente a espessura). No caso dos protótipos ensaiados, “t” é a espessura do painel, cuja dimensão é 14,2cm. Assim, aplicando-se a fórmula e dividindo-se 14,2 por 30, tem-se 0,473cm como resultado. Neste caso, a excentricidade adotada para a aplicação de carga deve ser 1cm, no mínimo. Com isso, durante a preparação do ensaio, o cilindro hidráulico foi deslocado de 1cm a 2cm em relação ao centro do painel, tomando como referência a sua espessura. Além disso, a norma exige que sejam ensaiadas pelo menos 10 etapas de carregamento nos protótipos.

Deve ser enfatizado que, apesar da NBR 15575-2 exigir que os protótipos a serem testados neste ensaio possuam, no mínimo, 1,20m de largura, como relatado no item 2.3.2, foi interpretado que isso se aplicaria a elementos com largura maior que 1,20m. Uma vez que se entendeu que não faria sentido testar 1 painel inteiro somado a apenas parte de outro, no caso de elementos

com largura inferior a 1,20m. Com isso, os ensaios foram realizados de modo normal nos painéis projetados.

Já no tratamento dos dados adquiridos no ensaio, para o cálculo da carga suportada por um painel nos vários instantes, observou-se a leitura feita pelo manômetro da bomba hidráulica por meio dos vídeos gravados pelas câmeras fotográficas. A marcação feita pelo manômetro em “psi” era transformada em “bar” e multiplicada por 0,0318, conforme orientação do fabricante do conjunto hidráulico (Nowak). Como resultado obtêm-se a carga total em toneladas suportada pelo painel, posteriormente transformada em quilogramas. Por sua vez, também por meio dos vídeos gravados pelas câmeras fotográficas, observou-se a leitura feita pelos relógios comparadores, que mediam os deslocamentos em milímetros. Desse modo, com a carga total e os respectivos deslocamentos traçou-se o diagrama Carga x Deslocamento para os 3 protótipos. Para o cálculo da resistência à compressão, as cargas suportadas por cada protótipo foram multiplicadas pela aceleração da gravidade (aqui adotada como $9,80665\text{m/s}^2$), a fim de calcular as forças de compressão em newtons, e divididas por sua seção transversal bruta (1420cm^2), chegando-se à tensão aplicada. Por fim, os valores de tensão encontrados foram utilizados nas equações determinadas pela NBR 15575-2, chegando-se à resistência característica do painel.

7 RESULTADOS DOS ENSAIOS, ANÁLISE E EXIGÊNCIAS DAS NORMAS

Os resultados dos três tipos de ensaios mecânicos realizados nos protótipos CP 1, CP 2 e CP 3 foram fotografados e anotados. Em seguida, foram comparados aos níveis de desempenho apresentados pelas NBR 15575-2 e NBR 15575-4.

7.1 Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: CP 1

Os resultados do ensaio do protótipo CP 1 foram agrupados no Quadro 10.

Quadro 10: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro no protótipo CP 1.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO: RESULTADOS – CP 1									
Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura	Mossas		Observação visual				Observações
			Ocorrência	Profundidade (mm)	Ruína/Falha	Fissura	Destacamento	Outros	
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 0,50m	Sim	0,18	Não	Não	Não	Não	Em alguns pontos ocorreram mossas, em outros não.
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 0,75m	Sim	0,23	Não	Não	Não	Não	Todos os impactos causaram mossas. Mossas visíveis a 1,40m de distância do painel.
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 1,00m	Sim	0,28	Não	Não	Não	Não	Todos os impactos causaram mossas. Mossas visíveis a 2,10m de distância do painel. Parafuso amassado com o impacto.
10	Esfera de aço 1kg	h = 1,00m	Sim	0,34	Não	Não	Não	Não	Todos os impactos causaram mossas. Mossas visíveis a 2,10m de distância do painel. Parafuso amassado com o impacto.
10	Esfera de aço 1kg	h = 2,00m	Sim	0,37	Não	Não	Não	Não	Todos os impactos causaram mossas. Mossas visíveis a 2,80m de distância do painel. Parafuso amassado com o impacto.
10	Esfera de aço 1kg	h = 3,00m	Sim	0,42	Não	Não	Não	Sim (Depressão)	Todos os impactos causaram mossas. Mossas visíveis a 2,80m de distância do painel. Parafuso amassado com o impacto. Também foi verificado que os impactos causaram uma depressão com 1,56mm de profundidade e 15cm de largura na porção direita de uma das peças do painel. Apesar dos impactos terem sido feitos em diferentes peças, este fenômeno foi observado apenas na peça citada.

Tanto os impactos causados pela esfera de 0,5kg assim como aqueles causados pela de 1,0kg causaram mossas no protótipo, independentemente da altura de abandono. Contudo, as mossas causadas pela esfera de 0,5kg abandonada da altura de 0,50m foram muito pequenas,

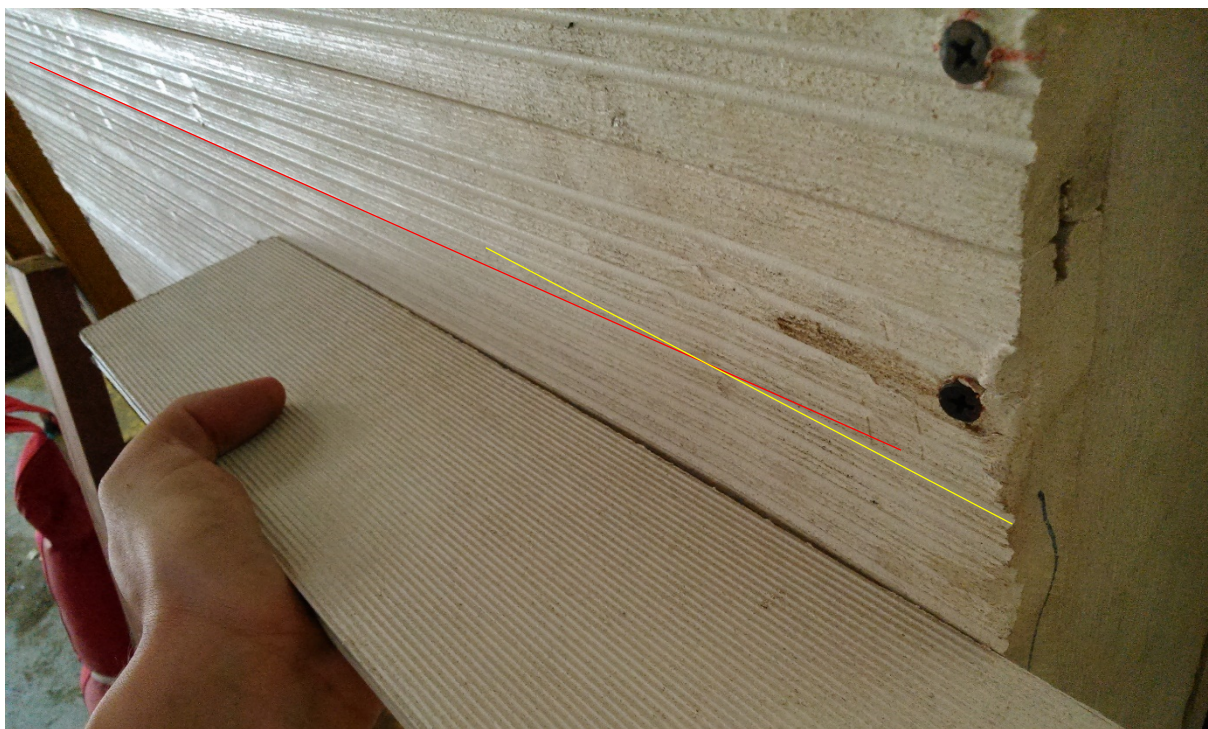
aparentando mais um pequeno afundamento do ponto onde colidiu do que, efetivamente, o que se conceitua como moessa (Figura 79). Além disso, em alguns impactos não foi percebida, a olho nu, nenhuma deformação, nem mesmo o pequeno afundamento citado. Já quando a altura de abandono aumentou para 0,75m começaram a se formar moessas com profundidade acima de 0,2mm com o impacto. Como era de se esperar, as moessas ficaram mais profundas com o aumento da altura de abandono e com o uso da esfera de 1,0kg, chegando a um máximo de 0,42mm de profundidade (Figura 79).

Figura 79: À esquerda, moessa com 0,18mm de profundidade causada pelo impacto da esfera de 0,5kg abandonada a 0,50m de altura. À direita, moessa com 0,42mm de profundidade causada pelo impacto da esfera de 1,0kg abandonada a 3,00m de altura.



Apesar de não terem sido identificadas fissuras, falhas, ruína e destacamentos nas peças do protótipo para nenhuma altura de abandono e esfera utilizada, para a altura de 3,0m, a esfera de 1,0kg causou uma depressão em forma de arco com 1,56mm de profundidade e 15cm de largura numa das peças (Figura 80).

Figura 80: Depressão numa peça do painel. A linha vermelha segue a cava natural do perfil da esquerda para a direita, enquanto a linha amarela segue a mesma cava da direita para a esquerda, evidenciando uma mudança em sua direção causada pela depressão.



Por último, quando as esferas de 0,5kg e 1,0kg foram abandonadas próximas e sobre os parafusos que fixavam as peças de compósitos nos montantes (Figura 81), foram registrados amassamentos dos parafusos a partir da altura de 1,0m (Figura 82). Não foram visualizados outros fenômenos ao longo do ensaio.

Figura 81: Esfera de 0,5kg abandonada para impacto próximo e sobre os parafusos.



Figura 82: Dois parafusos distintos deformados com os impactos das esferas de aço. À esquerda, parafuso com a cabeça amassada no lado esquerdo; à direita, parafuso com a cabeça entortada para o lado direito.



7.2 Análise do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: CP 1

A NBR 15575-4 coloca como critérios e níveis de desempenho o exposto no Quadro 11. Considerando os parâmetros normatizados e os resultados obtidos nos ensaios com o protótipo CP 1, tem-se que o sistema construtivo se encaixa no nível “Intermediário”, nível máximo proposto pela NBR 15575-4, uma vez que não são descritos por tal norma os requisitos necessários para se alcançar o nível “Superior”. Para todas as energias testadas, até para 30J (altura de abandono igual a 3,0m), não houve ruptura do painel nem seu traspassamento, ocorrendo apenas mossa com no máximo 0,42mm de profundidade ao longo de todo o ensaio e uma depressão com 1,56mm de profundidade formada numa das peças do protótipo e descrita no Quadro 10 (ver item 7.1), porém, esta ocorreu para a energia de 30J.

Quadro 11: Critérios e níveis de desempenho definidos pela NBR 15575-4 para ensaios de resistência ao impacto de corpo mole.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO: EXIGÊNCIAS				
Vedação vertical com ou sem função estrutural	Esfera de aço	Energia de impacto de corpo duro (altura*)	Critério de desempenho	Nível de desempenho
	0,5kg	3,75J (0,50m)	Não ocorrência de falhas. São admitidas mossa.	Mínimo
	1,0kg	20J (2,00m)	Não ocorrência de ruptura e traspassamento.	
	0,5kg	3,75J (0,50m)	Não ocorrência de falhas. Profundidade da mossa ≤ 2 mm.	Intermediário
	1,0kg	20J (2,00m)	Não ocorrência de ruptura e traspassamento.	

A NBR 15575-4 não expõe os critérios referentes ao nível de desempenho “Superior”.

Fonte: Adaptado de NBR 15575-4.

Com isso, em relação a este ensaio, o painel está adequado para ser utilizado numa situação real, não sendo identificada a necessidade de modificações em seu projeto.

7.3 Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: CP 1

Os resultados do ensaio do protótipo CP 1 foram agrupados no Quadro 12. Foram registradas falhas do protótipo a partir do impacto de menor energia, isto é, aquele no qual o saco de 40kg é abandonado da menor altura prevista nas NBRs (0,30m). Três falhas identificadas na altura de abandono de 0,30m se repetiram até a última altura ensaiada, porém foram se intensificando os seguintes aspectos: desalinhamento das peças que formam os montantes com consequente projeção do painel para a frente (na direção do saco de areia) e desprendimento de alguns parafusos das 3 peças superiores de compósito, o que ocasionou o destacamento de algumas delas em mais de 4mm (Figura 83). Aparentemente, o desalinhamento das peças dos montantes atuou como uma alavanca, desprendendo os parafusos. Com o aumento da altura para 0,60m e 0,90m continuou-se registrando o desprendimento dos parafusos citados somado ao rompimento de alguns deles (Figura 84).

Quadro 12: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole no protótipo CP 1.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE: RESULTADOS – CP 1									
Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura (m)	Deslocamento horizontal		Observação visual				Observações
			Instantâneo (mm)	Residual (mm)	Ruína	Fissura	Destacamento	Outros	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,30	28	3	Não	Não	Sim	Sim (projeção do painel para a frente)	Desalinhamento das peças dos montantes com consequente desprendimento de alguns parafusos das 3 peças superiores de compósito (principalmente os daquelas na junção entre as 2 peças que formam os montantes), ocasionando o destacamento de algumas peças em até 4,28mm e uma pequena projeção do painel para a frente.
1	Saco de couro 40kg	h = 0,45	37	1	Não	Não	Sim	Sim (desestabilização do painel)	Desalinhamento das peças dos montantes com consequente desprendimento dos mesmos parafusos citados, ocasionando o destacamento de algumas peças em até 5,40mm e uma pequena projeção do painel para a frente.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE: RESULTADOS – CP 1

Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura (m)	Deslocamento horizontal		Observação visual				Observações
			Instantâneo (mm)	Residual (mm)	Ruína	Fissura	Destacamento	Outros	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,60	44	2	Não	Não	Sim	Sim (desestabilização do painel e rompimento de parafuso)	Desalinhamento das peças dos montantes com consequente desprendimento dos mesmos parafusos citados, destacamento de algumas peças e uma pequena projeção do painel para a frente. Os parafusos do lado esquerdo das 2 peças mais altas se romperam próximo à cabeça.
1	Saco de couro 40kg	h = 0,90	49	3	Não	Não	Sim		Desalinhamento das peças dos montantes com consequente desprendimento dos mesmos parafusos citados, destacamento de algumas peças e uma pequena projeção do painel para a frente. O parafuso superior esquerdo da terceira peça mais alta se rompeu.
1	Saco de couro 40kg	h = 1,20	62	14	Sim	Não	Sim		Ruína: falha nas 3 peças superiores da parede traseira e arrancamento e/ou quebra de seus respectivos parafusos; falha na junção das 2 peças que formam os montantes.
1	Saco de couro 40kg	h = 1,80	-	-	-	-	-	-	Não realizado
1	Saco de couro 40kg	h = 2,40	-	-	-	-	-	-	Não realizado

Figura 83: Desalinhamento das peças dos montantes, desprendimento dos parafusos e destacamento das peças de compósito na junção entre os montantes. Fotos capturadas após o impacto da altura de 0,30m.

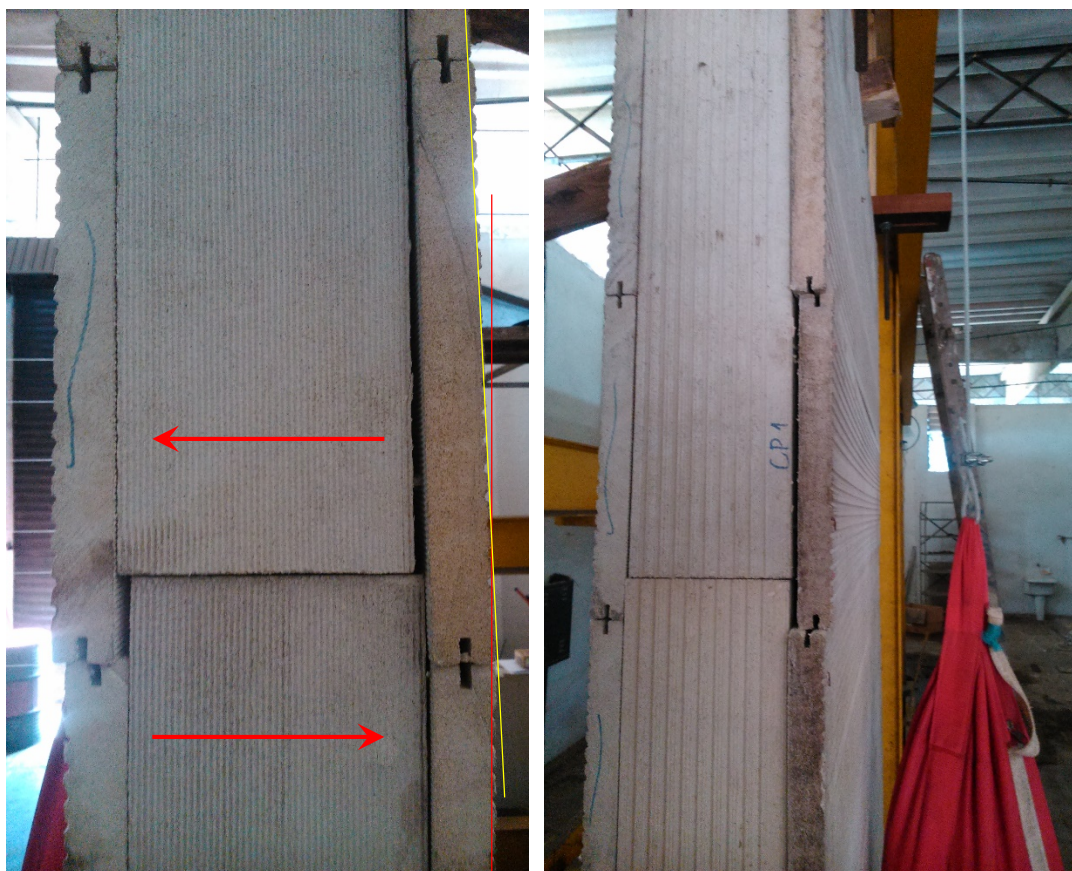


Figura 84: Parafusos das peças superiores rompidos para as alturas de 0,60m e 0,90m.



Apesar de ter se iniciado logo no primeiro impacto, a projeção para a frente das peças superiores do painel era pouco perceptível para as primeiras alturas de abandono (Figura 83). Porém, quando a altura passou para 1,20m houve a ruína parcial do protótipo e a projeção para a frente das 3 peças superiores das paredes interna e externa se tornou nítida (Figura 85).

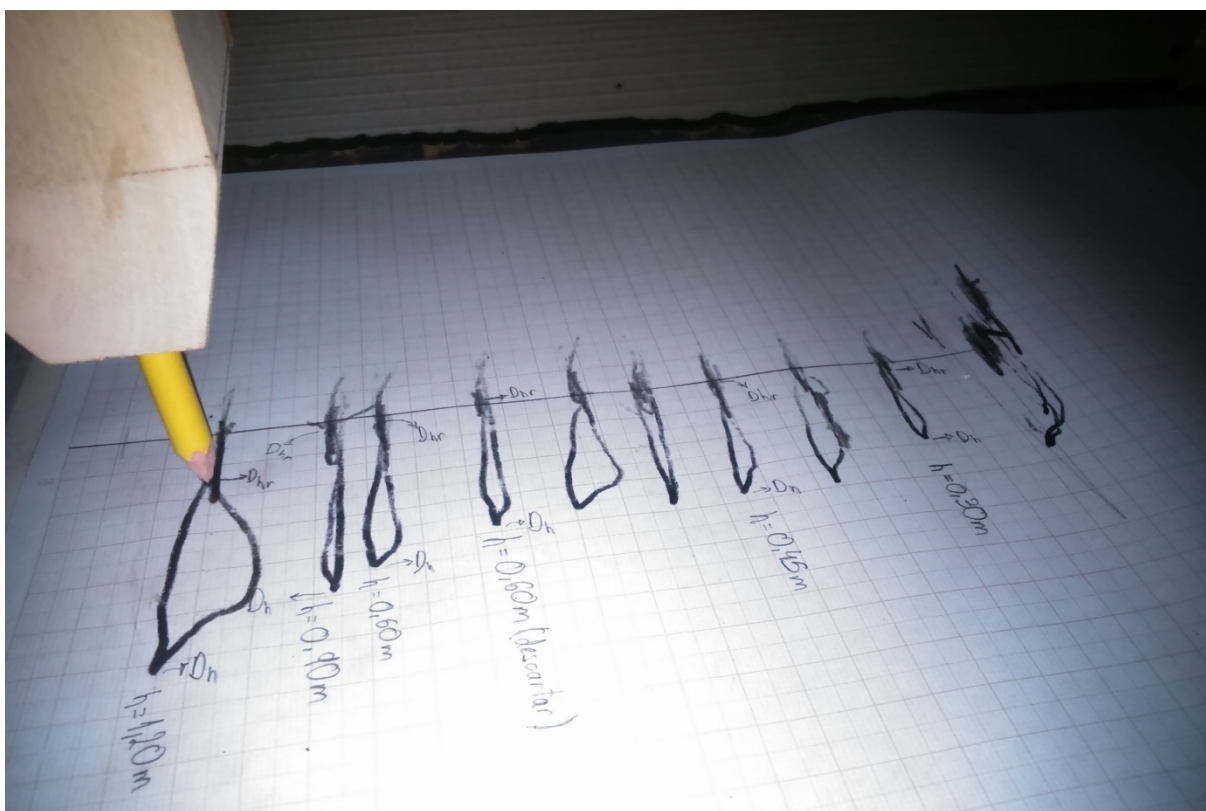
Figura 85: Ruína do protótipo ocorrida para a altura de abandono de 1,20m.



Tal projeção pode ter influenciado os valores dos deslocamentos horizontais, uma vez que as peças superiores, ao se projetarem para a frente, empurram as demais para trás, fazendo com que o lápis que marca os deslocamentos também fosse empurrado nesta direção, como pode ser visto na imagem central da Figura 85.

Por fim, antes e durante o ensaio foram realizados alguns impactos cujos resultados foram descartados (Figura 86). Isso foi feito ou porque a finalidade do impacto era testar o aparato montado para o ensaio ou porque houve alguma falha durante a sua execução. Visto que a NBR 15575-2 exige que seja executado apenas um impacto para cada altura de abandono, os impactos não contabilizados podem ter influenciado o resultado final do ensaio com o protótipo CP 1.

Figura 86: Registro dos deslocamentos sofridos pelo CP 1. Alguns dos impactos foram descartados. É possível ver ainda a marcação na folha milimetrada dos pontos de deslocamento horizontal instantâneo (D_h) e residual (D_{hr}) do painel para cada altura de abandono.



Ressalta-se que, excetuando as peças citadas, não foram identificadas falhas, fissuras ou destacamentos nas demais para nenhuma altura de abandono do saco de 40kg. A base do protótipo também permaneceu sem deformações e falhas.

7.4 Análise do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: CP 1

A NBR 15575-4 coloca como critérios e níveis de desempenho o exposto no Quadro 13. Considerando os parâmetros normatizados e comparando aos resultados obtidos nos ensaios com o protótipo CP 1, tem-se que o painel estrutural de vedação não atende aos critérios de desempenho do nível “Mínimo” para nenhuma energia de impacto, nem mesmo a menor delas (120J). Isso porque foi identificada uma falha, especificamente um destacamento das 3 peças superiores do painel, logo para a primeira energia de impacto (ver item 7.3).

Quadro 13: Critérios e níveis de desempenho definidos pela NBR 15575-4 para ensaios de resistência ao impacto de corpo mole.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE: EXIGÊNCIAS			
Vedação vertical de casa térrea com função estrutural	Energia de impacto de corpo mole (altura)	Critério de desempenho	Nível de desempenho
	120J (0,30m)	Não ocorrência de falhas.	Mínimo
	180J (0,45m)		
	240J (0,60m)	Não ocorrência de falhas. Limitação dos deslocamentos horizontais*: $d_h \leq h/250$ $d_{hr} \leq h/1250$	
	360J (0,90m)	Não ocorrência de ruína.	
	480J (1,20m)		
	720J (1,80m)		
	120J (0,30m)	Não ocorrência de falhas.	Intermediário / Superior
	180J (0,45m)		
	240J (0,60m)	Não ocorrência de falhas. Limitação dos deslocamentos horizontais*: $d_h \leq h/250$ $d_{hr} \leq h/1250$	
	360J (0,90m)	Não ocorrência de falhas.	
	480J (1,20m)		
	720J (1,80m)		
	960J (2,40m)	Não ocorrência de ruína (estado limite último).	

Onde: h é a altura do elemento de vedação; d_h é o deslocamento horizontal instantâneo; e d_{hr} é o deslocamento horizontal residual.

Para sistemas leves (peso $\leq 600 \text{ N/m}^2$) podem ser admitidos deslocamentos horizontais instantâneos iguais ao dobro do valor mencionado, desde que os deslocamentos horizontais residuais respeitem o valor máximo definido; tal condição também pode ser adotada no caso de sistemas destinados a sobrados unifamiliares.

Fonte: Adaptado da NBR 15575-4.

Uma vez que o painel desenvolvido é considerado leve de acordo com a NBR 15575-4, isto é, possui peso/m² abaixo de 600N/m² (os painéis pesam 573,208N/m²), o deslocamento horizontal instantâneo pode ser o dobro que o calculado conforme a fórmula $d_h \leq h/250$ (ver Quadro 13). Se analisados os deslocamentos horizontais instantâneos e residuais sofridos pelo painel, o primeiro também não atende aos critérios de desempenho do nível “Mínimo”, ou seja, está acima do máximo admitido em norma. Todavia, o deslocamento horizontal residual está dentro do exigido (Quadro 14).

Quadro 14: Deslocamentos horizontais sofridos pelo protótipo CP 1 em relação aos máximos admitidos em norma.

ALTURA DE ABANDONO	DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS SOFRIDOS PELO PROTÓTIPO CP 1		DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS MÁXIMOS ADMITIDOS PELA NBR 15575-4	
	Deslocamentos instantâneos (mm)	Deslocamentos residuais (mm)	Deslocamentos instantâneos “d _h ” (mm)	Deslocamentos residuais “d _{hr} ” (mm)
h = 0,30m	28	3	-	-
h = 0,45m	37	1	-	-
h = 0,60m	44	2	20,8 ^a	2,08 ^b
h = 0,90m	49	3	-	-
h = 1,20m	62	14	-	-
h = 1,80m	-	-	-	-
h = 2,40m	-	-	-	-

^a Valor calculado da seguinte forma: $d_h \leq h/250$, onde $h = 2600\text{mm}$ (altura do painel de vedação); chegando-se a 10,4mm; como o painel é considerado um sistema construtivo leve, tem-se que $d_h \leq 10,4\text{mm} \times 2$, logo $d_h \leq 20,8\text{mm}$.

^b Valor calculado da seguinte forma: $d_{hr} \leq h/1250$, onde $h = 2600\text{mm}$ (altura do painel de vedação); chegando-se a 2,08mm.

Desse modo, o painel não está apto para ser utilizado numa situação real em relação a esse critério. Para tanto, o projeto deve ser modificado de forma que nenhuma falha – como o desprendimento dos parafusos e o destacamento das peças de compósito – aconteça nas alturas de 0,30m, 0,45m e 0,60m, e de modo que os deslocamentos horizontais instantâneos e residuais sejam menores que os máximos previstos na NBR 15575-4. Com a análise visual dos resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole percebeu-se que a junção dos montantes pode ter sido o ponto fraco. Esta provavelmente atuou como uma alavanca para o desprendimento e rompimento dos parafusos com o consequente destacamento das peças de compósito. Entretanto, tais falhas ocorreram somente nas peças acima da junção. Para aquelas situadas abaixo da junção, não foi detectada nenhuma falha. Como o comprimento máximo das peças era de 2,0m e a altura do painel é 2,60m, foi realizada a junção para que os montantes percorressem toda a altura dos painéis. Por outro lado, caso eles não possuíssem junções, isto é, caso fossem da altura dos painéis, provavelmente os problemas relatados seriam minimizados. Isto também vale para os deslocamentos horizontais, já que desde os impactos de menor energia foi detectado um pequeno desalinhamento entre as duas peças que formam cada montante, o que causou uma pequena alteração no prumo do protótipo. Esta alteração no prumo pode ter aumentado os deslocamentos horizontais instantâneos e residuais.

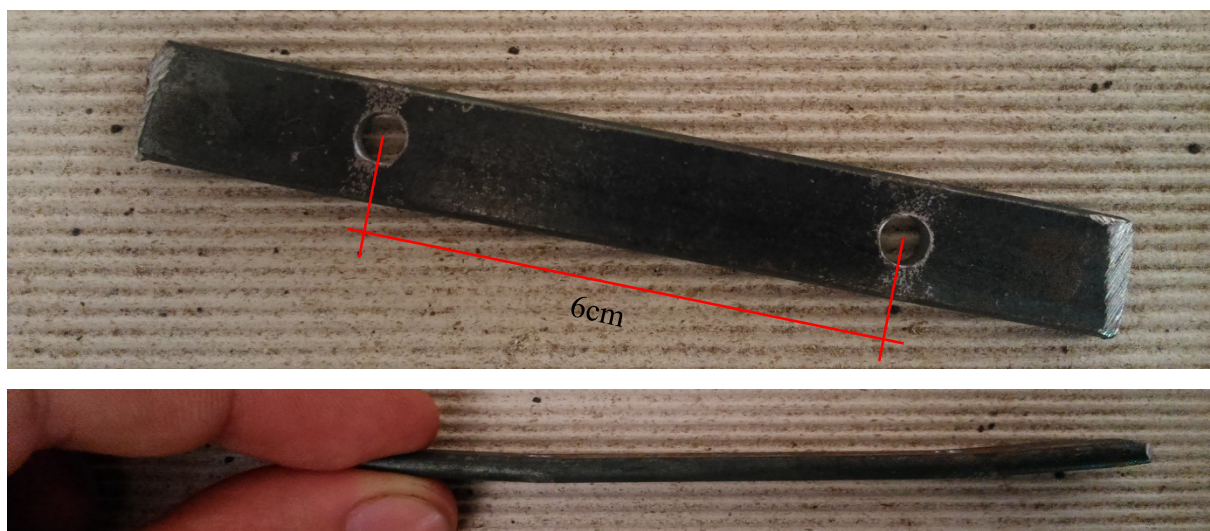
7.5 Modificações do painel

Devido ao mal desempenho dos painéis estruturais de vedação no ensaio de resistência ao impacto de corpo mole, os ensaios foram interrompidos para que fosse pensado um modo de melhorá-lo.

Como as NBR 15575-2 e NBR 15575-4 não estabelecem um número mínimo de corpos de prova para os ensaios de resistência ao impacto de corpo mole e de corpo duro, e a intenção era de testar os 3 protótipos nos 3 tipos de ensaio, houve uma margem para que modificações pontuais fossem realizadas nos painéis antes da execução do ensaio de resistência à compressão no 1º protótipo. Isso porque as NBRs exigem que sejam testados 3 protótipos semelhantes neste ensaio.

Assim, a fim de que o painel apresentasse pelo menos o desempenho “Mínimo” no ensaio de resistência ao impacto de corpo mole, pensou-se numa forma de fazer as duas peças que formam cada montante trabalharem conjuntamente e evitar as falhas descritas no item 7.2. Para isso, foram parafusadas duas chapas de aço de 3,18mm de espessura e 13,0mm de largura ligando as peças dos montantes de cada lado do painel, buscando assim simular o comportamento de uma peça contínua. A distância entre os centros dos furos das chapas de aço é de 6cm (Figura 87).

Figura 87: A imagem superior mostra a vista superior da chapa e a distância de 6cm entre os furos. A imagem inferior mostra a espessura da chapa (3,18mm).



Para parafusar as chapas de aço nos montantes foram utilizados parafusos de 4,5mm de diâmetro e 40mm de comprimento. A Figura 88 mostra a aparência final de um painel após a fixação das chapas de aço nos montantes.

Figura 88: Pannel após a fixação das chapas de aço ligando os montantes. As imagens mostram a lateral esquerda do pannel. O mesmo procedimento foi feito na lateral direita.



Após a realização dessa modificação nos protótipos, retomou-se a execução dos ensaios e foi feito o ensaio de resistência à compressão no protótipo CP 1. Entretanto, os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos 3 protótipos (CP1, CP 2 e CP 3) foram agrupados, conforme determinam as NBR 15575-2 e NBR 15575-4, e são mostrados mais adiante no item 7.10.

7.6 Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: CP 2 e CP 3 (modificados)

O resultado do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro após a modificação dos protótipos foi praticamente o mesmo resultado obtido antes da modificação. As diferenças observadas foram uma pequena variação na profundidade das moissas, chegando a um mínimo de 0,22mm e a um máximo de 0,56mm, e a não ocorrência da depressão identificada no CP 1. De modo geral, as moissas ficaram mais profundas com o aumento da altura de abandono e com o uso da esfera de 1,0kg. As sínteses dos resultados para os protótipos CP 2 e CP 3 são apresentadas nos Quadros 15 e 16, respectivamente.

Quadro 15: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro no protótipo CP 2.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO: RESULTADOS APÓS MODIFICAÇÃO DOS PAINÉIS – CP 2									
Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura	Mossas		Observação visual				Observações
			Ocorrência	Profundidade (mm)	Ruína/Falha	Fissura	Destacamento	Outros	
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 0,50m	Sim	0,22	Não	Não	Não	Não	Em alguns pontos ocorreram mossas, em outros não.
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 0,75m	Sim	0,30	Não	Não	Não	Não	Todos os impactos causaram mossas.
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 1,00m	Sim	0,40	Não	Não	Não	Não	
10	Esfera de aço 1kg	h = 1,00m	Sim	0,34	Não	Não	Não	Não	
10	Esfera de aço 1kg	h = 2,00m	Sim	0,50	Não	Não	Não	Não	
10	Esfera de aço 1kg	h = 3,00m	Sim	0,46	Não	Não	Não	Não	

Quadro 16: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro no protótipo CP 3.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO: RESULTADOS APÓS MODIFICAÇÃO DOS PAINÉIS – CP 3									
Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura	Mossas		Observação visual				Observações
			Ocorrência	Profundidade (mm)	Ruína/Falha	Fissura	Destacamento	Outros	
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 0,50m	Sim	0,24	Não	Não	Não	Não	Em alguns pontos ocorreram mossas, em outros não.
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 0,75m	Sim	0,40	Não	Não	Não	Não	Todos os impactos causaram mossas.
10	Esfera de aço 0,5kg	h = 1,00m	Sim	0,40	Não	Não	Não	Não	
10	Esfera de aço 1kg	h = 1,00m	Sim	0,28	Não	Não	Não	Não	
10	Esfera de aço 1kg	h = 2,00m	Sim	0,56	Não	Não	Não	Não	
10	Esfera de aço 1kg	h = 3,00m	Sim	0,50	Não	Não	Não	Não	

7.7 Análise do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro: CP 2 e CP 3 (modificados)

A NBR 15575-4 coloca como critérios e níveis de desempenho o exposto no Quadro 11. Considerando os parâmetros normatizados e comparando aos resultados obtidos nos ensaios com os protótipos CP 2 e CP 3, tem-se que o painel estrutural de vedação se encaixa no nível “Intermediário”, nível máximo exposto pela NBR 15575-4, uma vez que não são descritos por tal norma os requisitos necessários para se alcançar o nível “Superior”. Para todas as energias testadas, até para 30J (altura de abandono igual a 3,0m), não houve ruptura do painel nem seu traspasse, ocorrendo apenas moissas com no máximo 0,56mm de profundidade ao longo de todo o ensaio. Desse modo, tem-se que o nível de desempenho alcançado pelos protótipos CP 1 (sem a modificação), CP 2 e CP 3 (com a modificação) foi o mesmo, isto é, “Intermediário” (ver item 7.2).

7.8 Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: CP 2 e CP 3 (modificados)

As sínteses dos resultados dos ensaios para os protótipos CP 2 e CP 3 são mostradas nos Quadros 17 e 18, respectivamente.

Quadro 17: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole no protótipo CP 2.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE: RESULTADOS APÓS MODIFICAÇÃO DOS PAINÉIS – CP 2									
Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura	Deslocamento horizontal		Observação visual				Observações
			Instantâneo (mm)	Residual (mm)	Ruína	Fissura	Destacamento	Outros	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,30m	24	0	Não	Não	Não	Não	Nenhuma falha observada.
1	Saco de couro 40kg	h = 0,45m	32	0	Não	Não	Não	Não	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,60m	42	1	Não	Não	Não	Não	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,90m	49	0	Não	Não	Não	Não	
1	Saco de couro 40kg	h = 1,20m	57	0	Não	Não	Não	Não	

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE: RESULTADOS APÓS MODIFICAÇÃO DOS PAINÉIS – CP 2

Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura	Deslocamento horizontal		Observação visual				Observações
			Instantâneo (mm)	Residual (mm)	Ruína	Fissura	Destacamento	Outros	
1	Saco de couro 40kg	h = 1,80m	69	2	Não	Não	Não	Sim (afrouxamento de porca)	A porca superior traseira esquerda (tomando como referência o lado onde o saco de couro impacta o painel como frente) sofreu afrouxamento com o impacto, deixando sua respectiva barra rosqueada também frouxa.
1	Saco de couro 40kg	h = 2,40m	-	-	-	-	-	-	-

Quadro 18: Resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole no protótipo CP 3.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE: RESULTADOS APÓS MODIFICAÇÃO DOS PAINÉIS – CP 3

Nº de Impactos	Corpo percussor de impacto	Altura	Deslocamento horizontal		Observação visual				Observações
			Instantâneo (mm)	Residual (mm)	Ruína	Fissura	Destacamento	Outros	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,30m	23	0,5	Não	Não	Não	Não	Nenhuma falha observada. O sinal negativo no deslocamento horizontal residual do impacto da altura h = 0,60m indica um deslocamento contrário ao sentido de abandono do saco de couro.
1	Saco de couro 40kg	h = 0,45m	34	0,5	Não	Não	Não	Não	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,60m	40	-2,0	Não	Não	Não	Não	
1	Saco de couro 40kg	h = 0,90m	50	1,5	Não	Não	Não	Sim (desalinhamento das peças dos montantes)	Pequeno desalinhamento das peças dos montantes.
1	Saco de couro 40kg	h = 1,20m	66	0	Não	Não	Não	Sim (rompimento de peça)	Peça central da parede externa se rompeu.
1	Saco de couro 40kg	h = 1,80m	94	0	Não	Não	Não		Peça abaixo da peça central da parede externa se rompeu.
1	Saco de couro 40kg	h = 2,40m	-	-	-	-	-	-	-

Com a fixação das chapas de aço nos montantes dos painéis, seu desempenho neste ensaio teve grande melhora. Tanto os deslocamentos horizontais instantâneos como os residuais tiveram diminuição, chegando a uma redução máxima de 17,8% e 100,0% com a modificação, respectivamente, sendo que nenhum dos dois protótipos sofreu ruína (Quadro 19).

Quadro 19: Deslocamentos horizontais do CP 1 (não modificado) e do CP 2 e CP 3 (modificados).

ALTURA DE ABANDONO	DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS INSTÂNTANEOS (mm)			DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS RESIDUAIS (mm)		
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
h = 0,30m	28	24 (-14,2%)	23 (-17,8%)	3	0 (-100,0%)	0,5 (-83,3%)
h = 0,45m	37	32 (-13,5%)	34 (-8,1%)	1	0 (-100,0%)	0,5 (-50,0%)
h = 0,60m	44	42 (-4,5%)	40 (-10,0%)	2	1 (-50,0%)	-2,0 (0,0%)
h = 0,90m	49	49 (0,0%)	50 (+2,0%)	3	0 (-100,0%)	1,5 (-50,0%)
h = 1,20m	62 (ruína)	57 (-8,0%)	66 (+6,4%)	14 (ruína)	0 (-100,0%)	0 (-100,0%)
h = 1,80m	-	69	94	-	2	2
h = 2,40m	-	-	-	-	-	-

Em parênteses são mostrados os percentuais de redução ou aumento dos deslocamentos horizontais registrados para os CP 2 e CP 3 em relação ao CP 1.

Para o protótipo CP 2 apenas foi identificada uma falha para a maior altura de abandono (1,80m): uma das porcas superiores sofreu afrouxamento (Figura 89), resultando num afrouxamento da respectiva barra rosqueada.

Figura 89: Porca afrouxada com o último impacto (h = 1,80m). Protótipo CP 2.



Por outro lado, o CP 3 teve um pequeno desalinhamento das duas peças que formam seus montantes após o impacto gerado da altura de 0,90m (Figura 90), com a peça central da parede externa quebrada ao meio com o impacto seguinte ($h = 1,20\text{m}$), conforme Figura 91, e a peça abaixo da peça central da parede externa também quebrada ao meio com o último impacto ($h = 1,80\text{m}$), conforme Figura 92.

Antes dos impactos citados foi realizado o impacto da altura de 0,60m, para o qual se detectou um deslocamento horizontal residual de $-2,0\text{mm}$ (Quadro 18), significando que este ocorreu no sentido contrário ao de abandono do saco de couro. O painel e os equipamentos do ensaio foram vistoriados, não sendo encontrada nenhuma anomalia. Não se sabe ao certo o que pode ter ocasionado tal fato, porém, uma possível explicação é que como os painéis são formados por várias peças comprimidas, pode ter ocorrido sua acomodação após o impacto.

Figura 90: Pequeno desalinhamento das peças do montante direito (considerando a face na qual o saco de couro impacta como frente) do CP 3 após o impacto de 0,90m. À esquerda, montante antes do impacto. À direita, montante após o impacto.



Figura 91: Peça central da parede externa rompida com o impacto ($h = 1,20\text{m}$). Protótipo CP 3.

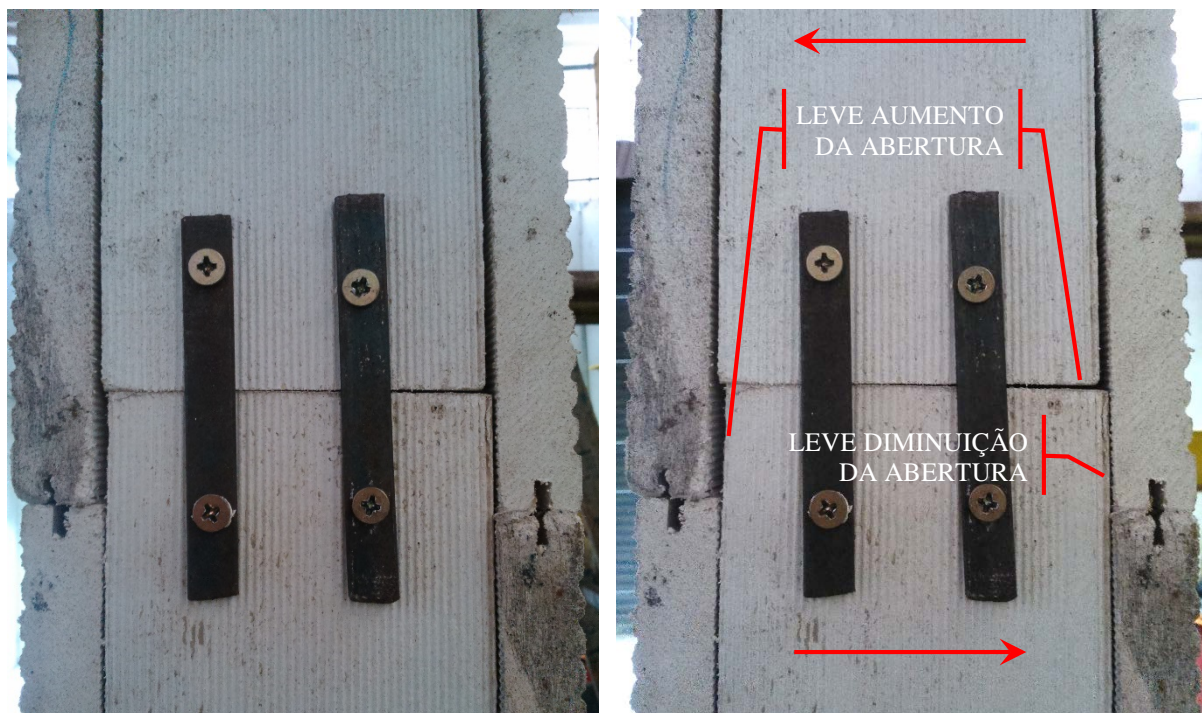


Figura 92: Peça abaixo da peça central da parede externa rompida com o impacto ($h = 1,80\text{m}$). Protótipo CP 3.



Com os impactos de 1,20m e 1,80m, o desalinhamento identificado no impacto de 0,90m teve um leve aumento (Figura 93).

Figura 93: CP 3 após impactos de 0,90m (à esquerda) e 1,80m (à direita).



Apesar das falhas citadas, não foram observados com os impactos problemas ou deformações que desestabilizassem o CP 3 como um todo (Figura 94). Devido a isso, essas três falhas foram consideradas pontuais, isto é, não foram consideradas como sendo a ruína do protótipo.

Figura 94: CP 3 após os impactos de 1,20m (à esquerda) e 1,80m (à direita). Não houve desestabilização ou ruína do protótipo.



Ressalta-se que, excetuando as peças citadas, não foram identificadas falhas, fissuras ou destacamentos nas demais para nenhuma altura de abandono do saco de 40kg, tanto para o protótipo CP 2 como para o CP 3. Também não foram observadas quebras ou arrancamentos de parafusos com os impactos, como ocorrido com o CP 1. Além disso, a base dos protótipos permaneceu sem deformações e falhas.

7.9 Análise do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole: CP 2 e CP 3 (modificados)

A NBR 15575-4 coloca como critérios e níveis de desempenho o exposto no Quadro 13. Considerando os parâmetros normatizados e comparando-os aos resultados obtidos nos ensaios com os protótipos CP 2 e CP 3, tem-se que o painel de vedação não atende aos critérios de desempenho do nível “Mínimo” definidos pela norma, apesar de somente uma exigência referente à energia de impacto de 240J ($h = 0,60\text{m}$) não ser cumprida. As exigências para a obtenção do nível “Mínimo” para todas as outras energias foram cumpridas, incluindo para as energias de impacto superiores à citada, isto é, 360J, 480J e 720J, que correspondem, respectivamente, às alturas de abandono 0,90m, 1,20m e 1,80m (Quadro 20). Isso porque o deslocamento instantâneo máximo para o impacto de 0,60m é 20,8mm (ver item 7.4), enquanto os registrados para os protótipos CP 2 e CP 3 foram 42mm e 40mm, respectivamente (ver item 7.8), conforme Quadro 21.

Quadro 20: Exigências da NBR 15575-4 x resultados observados.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO MOLE: EXIGÊNCIAS				RESULTADOS OBSERVADOS	
Vedação vertical de casa térrea com função estrutural	Energia de impacto de corpo mole (altura)	Critério de desempenho	Nível de desempenho	Protótipo CP 2	Protótipo CP 3
	120J (0,30m)	Não ocorrência de falhas.	Mínimo	Nenhuma falha observada.	Nenhuma falha observada.
	180J (0,45m)				
	240J (0,60m)	Não ocorrência de falhas. Limitação dos deslocamentos horizontais*: $d_h \leq h/250$ $d_{hr} \leq h/1250$		Nenhuma falha observada. Deslocamentos observados: $d_h \geq h/250$ $d_{hr} \leq h/1250$	Nenhuma falha observada. Deslocamentos observados: $d_h \geq h/250$ $d_{hr} \leq h/1250$
	360J (0,90m)	Não ocorrência de ruína.		Não ocorrência de ruína.	Não ocorrência de ruína.
	480J (1,20m)				
	720J (1,80m)				

Onde: h é a altura do elemento de vedação; d_h é o deslocamento horizontal instantâneo; e d_{hr} é o deslocamento horizontal residual.

Para sistemas leves ($\text{peso} \leq 600 \text{ N/m}^2$) podem ser admitidos deslocamentos horizontais instantâneos iguais ao dobro do valor mencionado, desde que os deslocamentos horizontais residuais respeitem o valor máximo definido; tal condição também pode ser adotada no caso de sistemas destinados a sobrados unifamiliares.

Se analisados os deslocamentos horizontais residuais sofridos pelos protótipos CP 2 e CP 3, eles estão dentro do exigido em norma (Quadro 21), assim como o deslocamento horizontal residual registrado para o CP 1 também estava.

Quadro 21: Deslocamentos horizontais sofridos pelos protótipos CP 2 e CP 3 em relação aos máximos admitidos em norma.

ALTURA DE ABANDONO	DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS SOFRIDOS PELOS PROTÓTIPOS CP 2 E CP 3				DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS MÁXIMOS ADMITIDOS PELA NBR 15575-4	
	Deslocamentos instantâneos (mm)		Deslocamentos residuais (mm)		Deslocamentos instantâneos “d _{hr} ” (mm)	Deslocamentos residuais “d _{hr} ” (mm)
	CP 2	CP 3	CP 2	CP 3		
h = 0,30m	24	23	0	0,5	-	-
h = 0,45m	32	34	0	0,5	-	-
h = 0,60m	42	40	1	-2,0	20,8 ^a	2,08 ^b
h = 0,90m	49	50	0	1,5	-	-
h = 1,20m	57	66	0	0	-	-
h = 1,80m	69	94	2	2	-	-
h = 2,40m	-	-	-	-	-	-

^a Valor calculado da seguinte forma: $d_h \leq h/250$, onde $h = 2600\text{mm}$ (altura do painel de vedação); chegando-se a 10,4mm; como o painel é considerado um sistema construtivo leve, tem-se que $d_h \leq 10,4\text{mm} \times 2$, logo $d_h \leq 20,8\text{mm}$.

^b Valor calculado da seguinte forma: $d_{hr} \leq h/1250$, onde $h = 2600\text{mm}$ (altura do painel de vedação); chegando-se a 2,08mm.

Assim, mesmo que a modificação executada nos protótipos tenha sido responsável por uma considerável melhora nos resultados dos ensaios de resistência ao impacto de corpo mole, ela não foi suficiente para propiciar um desempenho igual ao mínimo exigido pela NBR 15575-4, especificamente, um deslocamento horizontal instantâneo dentro do limite colocado pela norma.

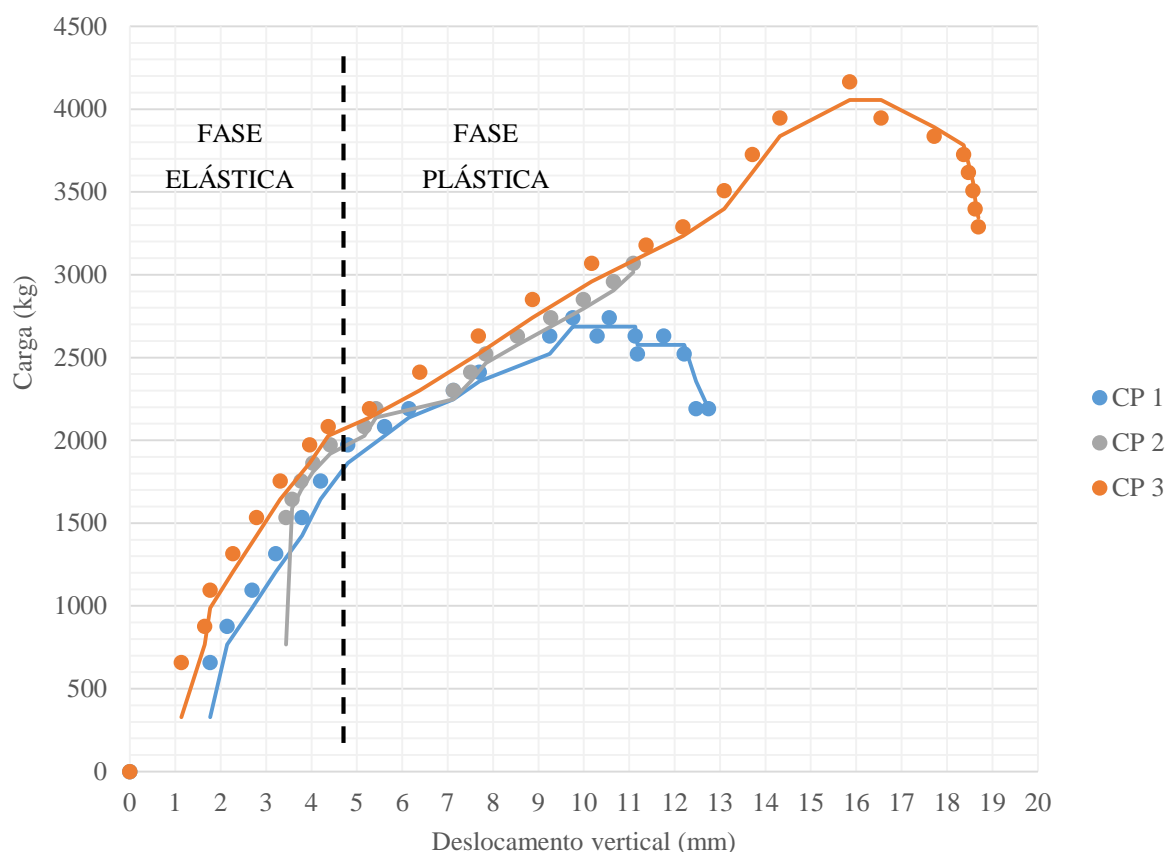
7.10 Ensaio de resistência à compressão: CP 1, CP 2 e CP 3 (modificados)

O ensaio de compressão foi realizado nos três protótipos após a fixação das chapas de aço nos montantes de cada um. O resultado dos ensaios é mostrado em forma de gráficos Carga x Deslocamento, para a relação entre a carga aplicada e o deslocamento vertical (Figura 95) e horizontal (Figura 96) sofrido pelos painéis, e também num quadro (Quadro 22), no qual são apresentados os valores observados de carga e tensão aplicados, deslocamento vertical e deslocamento horizontal (flambagem).

A Figura 95 mostra que os 3 protótipos tiveram comportamento mecânico semelhante até próximo da carga aplicada de 2800kg (equivalente a uma tensão de 19,34N/cm² ou 0,19MPa). Entre as cargas 0kg e 2000kg, os painéis apresentaram comportamento elástico e se deslocaram verticalmente entre 4mm e 5mm. Após essa carga, as curvas Carga x Deslocamento correspondentes a cada um mostraram diminuição de inclinação, caracterizando o comportamento plástico. Entre as cargas 2000kg e 2800kg, aproximadamente, os protótipos, já na fase plástica, continuaram apresentando comportamento semelhante e se deslocaram

verticalmente entre 9mm e 10mm, aproximadamente. Entretanto, após a carga de 2800kg os 3 tiveram comportamentos distintos: o CP 1 entrou em fase de ruptura, tendo um deslocamento vertical máximo igual a 12,75mm, enquanto o CP 2 continuou suportando o aumento da carga até o limite de 3070kg quando, após se deslocar na vertical 11,09mm (Quadro 22), se rompeu repentinamente, caracterizando uma ruptura frágil, isto é, aquela na qual o deslocamento na fase plástica é muito pequeno. Já o CP 3 suportou o aumento de carga até o limite de 4166kg, entrando em fase de ruptura após esse limite e, ao se romper, apresentando um deslocamento vertical de 18,69mm (Quadro 22).

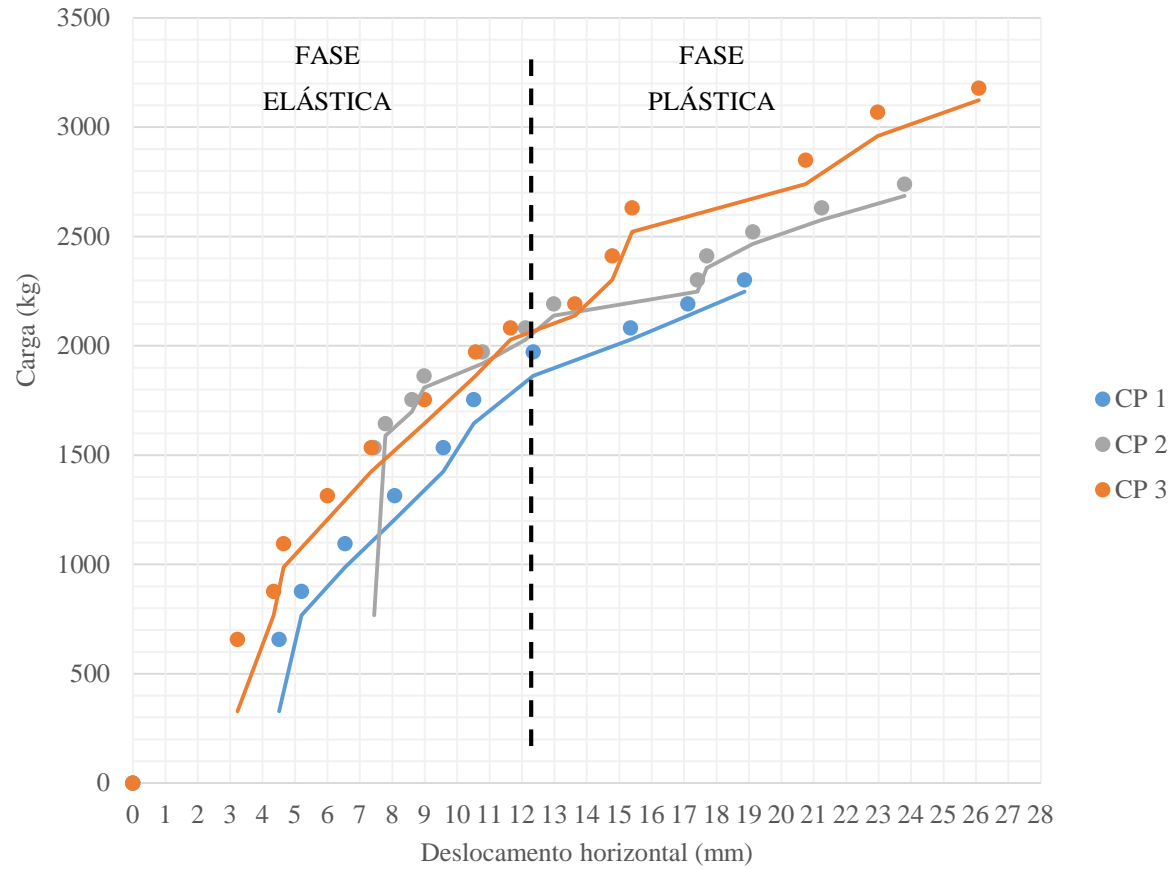
Figura 95: Gráfico Carga x Deslocamento (vertical) dos 3 protótipos testados. A linha tracejada preta indica, a grosso modo, o limite entre as fases elástica e plástica.



Além das cargas suportadas e os deslocamentos verticais apresentados, também deve-se analisar os respectivos deslocamentos horizontais (Figura 96). Nesse sentido, o Quadro 22 mostra que todos os deslocamentos horizontais sofridos por todos os protótipos são, no mínimo, o dobro dos deslocamentos verticais observados para a mesma carga. Porém, não foi possível registrar os deslocamentos horizontais máximos sofridos pelos painéis devido às características dos relógios comparadores empregados nos ensaios, visto que estes não possuíam curso de

medição suficientemente longo. Com isso, o registro dos deslocamentos horizontais foi interrompido antes do término dos ensaios. Mesmo assim, com os dados adquiridos é possível visualizar o comportamento do painel de vedação em relação à flambagem até o início da fase plástica, conforme Figura 96, apesar da mudança na inclinação das curvas Carga x Deslocamento Horizontal (indicando a entrada dos protótipos na fase plástica) serem menos bruscas que as das curvas Carga x Deslocamento Vertical.

Figura 96: Gráfico Carga x Deslocamento (horizontal) dos 3 protótipos testados. A linha tracejada preta indica, a grosso modo, o limite entre as fases elástica e plástica.



Quadro 22: Cargas e tensões aplicadas e deslocamentos verticais e horizontais sofridos pelos 3 protótipos no ensaio de resistência à compressão.

CP 1					CP 2					CP 3				
Carga (kg)	σ (N/cm ²)	Dv (mm)	Dv (%)	Dh (mm)	Carga (kg)	σ (N/cm ²)	Dv (mm)	Dv (%)	Dh (mm)	Carga (kg)	σ (N/cm ²)	Dv (mm)	Dv (%)	Dh (mm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
658	4,54	1,77	0,07	4,51	1535	10,60	3,44	0,13	7,44	658	4,54	1,13	0,04	3,23
877	6,06	2,14	0,08	5,20	1644	11,36	3,57	0,14	7,79	877	6,06	1,65	0,06	4,34
1096	7,57	2,69	0,10	6,54	1754	12,11	3,77	0,15	8,61	1096	7,57	1,77	0,07	4,65
1316	9,09	3,21	0,12	8,07	1864	12,87	4,03	0,16	8,98	1316	9,09	2,27	0,09	6,00

CP 1					CP 2					CP 3				
Carga (kg)	σ (N/cm ²)	Dv (mm)	Dv (%)	Dh (mm)	Carga (kg)	σ (N/cm ²)	Dv (mm)	Dv (%)	Dh (mm)	Carga (kg)	σ (N/cm ²)	Dv (mm)	Dv (%)	Dh (mm)
1535	10,60	3,79	0,15	9,57	1973	13,63	4,41	0,17	10,78	1535	10,60	2,79	0,11	7,35
1754	12,11	4,20	0,16	10,51	2083	14,38	5,17	0,20	12,11	1754	12,11	3,31	0,13	8,99
1973	13,63	4,80	0,18	12,35	2193	15,14	5,42	0,21	12,98	1973	13,63	3,96	0,15	10,57
2083	14,38	5,61	0,22	15,35	2302	15,90	7,13	0,27	17,41	2083	14,38	4,37	0,17	11,65
2193	15,14	6,15	0,24	17,12	2412	16,66	7,51	0,29	17,70	2193	15,14	5,28	0,20	13,63
2302	15,90	7,13	0,27	18,86	2521	17,41	7,84	0,30	19,12	2412	16,66	6,39	0,25	14,79
2412	16,66	7,70	0,30	-	2631	18,17	8,54	0,33	21,24	2631	18,17	7,68	0,30	15,40
2631	18,17	9,25	0,36	-	2741	18,93	9,27	0,36	23,80	2850	19,68	8,87	0,34	20,75
2741	18,93	9,76	0,38	-	2850	19,68	9,99	0,38	-	3070	21,20	10,17	0,39	22,97
2631	18,17	10,29	0,40	-	2960	20,44	10,65	0,41	-	3179	21,96	11,37	0,44	26,09
2741	18,93	10,56	0,41	-	3070	21,20	11,09	0,43	-	3289	22,71	12,18	0,47	-
2631	18,17	11,13	0,43	-	-	-	-	-	-	3508	24,23	13,09	0,50	-
2521	17,41	11,18	0,43	-	-	-	-	-	-	3727	25,74	13,71	0,53	-
2631	18,17	11,76	0,45	-	-	-	-	-	-	3947	27,26	14,32	0,55	-
2521	17,41	12,21	0,47	-	-	-	-	-	-	4166	28,77	15,86	0,61	-
2193	15,14	12,47	0,48	-	-	-	-	-	-	3947	27,26	16,55	0,64	-
2193	15,14	12,75	0,49	-	-	-	-	-	-	3837	26,50	17,72	0,68	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3727	25,74	18,37	0,71	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3618	24,98	18,47	0,71	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3508	24,23	18,57	0,71	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3398	23,47	18,62	0,72	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3289	22,71	18,69	0,72	-

Onde σ é a tensão aplicada, Dv é o deslocamento vertical e Dh é o deslocamento horizontal.

As leituras dos deslocamentos horizontais foram interrompidas antes do término dos ensaios devido ao fim do curso de medição do relógio comparador utilizado.

A Figura 97 mostra o CP 1 após o ensaio de resistência à compressão. No caso deste protótipo, os montantes compostos de compósito termoplástico não foram capazes de suportar a tração aplicada pelos parafusos que fixavam as chapas de aço (Figura 98). Tal esforço de tração, e também de compressão, foi causado pela projeção para a frente das peças superiores do painel, que ocorreu mesmo com a junção das duas peças que formam os montantes pelas chapas de aço. Mesmo o painel sendo, a princípio, um elemento comprimido, a projeção para a frente de suas peças superiores acarretou no aparecimento de um esforço de flexão. Assim, enquanto as peças da face frontal do painel tendiam a se aproximar, caracterizando o esforço de compressão, as da face traseira tendiam a se afastar, caracterizando o esforço de tração. Na face tracionada, o esforço foi suficiente para expor as barras rosqueadas (Figura 98).

Figura 97: Deslocamento sofrido pelo CP 1 com o ensaio de resistência à compressão. À esquerda, montante lateral esquerdo. À direita, montante lateral direito.



Figura 98: Montante esquerdo (acima e à esquerda), montante direito (acima e à direita) e parede traseira (abaixo) do CP 1 rompido no ensaio de resistência à compressão. Percebe-se que as peças de uma face do painel tendem a se aproximar (compressão), enquanto as da face oposta tendem a se afastar (tração).



A Figura 99 mostra o CP 2 após o ensaio de resistência à compressão.

Figura 99: Ruptura da última peça da parede externa do CP 2 no ensaio de resistência à compressão.



Nesse protótipo, devido à excentricidade da aplicação de carga no ensaio, uma das componentes da força de compressão tendeu a arrancar as peças mais altas. Por sua vez, a força de fixação empregada pelos parafusos autoatarraxantes não foi suficiente para conter o arrancamento da peça superior da parede externa (Figura 100), caracterizando a ruína do painel antes que esse entrasse na fase de ruptura. Com isso, a carga máxima suportada pelo protótipo ficou sendo a que os parafusos suportaram contra o arrancamento. Além disso, a quina inferior direita da peça superior sofreu ruptura (Figura 100).

Figura 100: Peça superior da parede externa arrancada no ensaio de resistência à compressão. À direita, quina rompida.



Por fim, a Figura 101 mostra o CP 3 após o ensaio de resistência à compressão. Este protótipo sofreu rupturas em vários pontos. Entretanto, o processo de ruína teve início nas peças centrais da parede externa, que já estavam rompidas devido ao ensaio de resistência ao impacto de corpo mole. Com isso, a força de compressão que deveria ser transferida peça a peça, até a transmissão à base de apoio do painel, foi interrompida nas peças centrais. Por consequência, a arqueadura do protótipo na altura de tais peças teve início, o que começou a solicitar os montantes também na mesma altura e culminou em seu rompimento (Figura 102). Com a acentuação da arqueadura dos montantes no meio de sua altura, esses começaram a se arquear e romper também na área de engaste do painel (Figura 103). Apesar de ter sofrido rupturas em vários pontos, o CP 3 foi

o protótipo que suportou a maior carga e, assim, apresentou a maior resistência à compressão (ver Figura 95 e Quadro 22).

Figura 101: CP 3 após o ensaio de resistência à compressão.



Figura 102: Montantes rompidos na mesma altura das peças centrais da parede externa.



Figura 103: Montantes rompidos no local de engaste do painel.



7.11 Análise do ensaio de resistência à compressão: CP 1, CP 2 e CP 3 (modificados)

Conforme explicitado no item 2.3.2, o ensaio de resistência à compressão provê dados para duas análises: a de estado-limite último, isto é, aquele no qual ocorre a ruína do sistema construtivo, e a de estado-limite de serviço, ou seja, aquele no qual há o surgimento de deslocamentos e fissuras, por exemplo, que causam insegurança nos usuários ou atrapalham o funcionamento de instalações e equipamentos, como portas e janelas. A seguir são realizadas as duas análises.

7.11.1 Estado-limite último

A NBR 15575-2 expõe que para ser calculada a resistência à compressão no estado-limite último característica do sistema construtivo, com o seu valor já minorado, deve-se aplicar a Equação (2).

$$R_{ud} = \left[R_{u1} - \frac{R_{u3} - R_{u1}}{2} \times \varepsilon \right] \times \frac{1}{y_m} \leq (1 - 0,2 \times \varepsilon) \times R_{u1} \times \frac{1}{y_m}, \text{ com } y_m \geq 1,5 \quad (2)$$

Onde:

R_{ud} = resistência no estado-limite último admitida de projeto;

R_{u1} = resistência última do protótipo que suportou a menor carga;

R_{u3} = resistência última do protótipo que suportou a maior carga;

y_m = coeficiente de ponderação da resistência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003);

ε = coeficiente de minoração = $[(1 + *uA) \times (1 + *uB) \times (1 + *uC) \dots]$, sendo $*uA$, $*uB$ e $*uC$, iguais aos coeficientes de variação da resistência dos materiais A, B e C, respectivamente, correlativa a R_{ud} . Os materiais A, B, C e outros, devem constituir e reger, de forma majoritária, o comportamento mecânico do componente em análise na composição da resistência R_{ud} . Entretanto, a NBR 15575-2 coloca que, no caso de edificações térreas cuja altura total não supere 6,0m, não sendo possível realizar, por motivos técnicos ou de viabilidade econômica, o controle sistemático dos materiais A, B, C e outros, permite-se prescindir da obtenção estatística de $*uA$, $*uB$ e $*uC$, desde que se adote $\varepsilon = 1,5$ e $y_m = 2,0$.

No caso do painel desenvolvido, os materiais que o compõem vão de A a E, sendo eles o compósito termoplástico, a barra rosqueada, a porca, a arruela e o parafuso. Entretanto, como não há dados sobre os coeficientes de variação da resistência de tais materiais em relação ao

esforço de compressão, para o cálculo da resistência à compressão no estado limite último característica de projeto do sistema construtivo, foi considerado $\varepsilon = 1,5$ e $y_m = 2,0$. Aplicando-se os valores máximos de tensão suportados pelos protótipos CP 1 e CP 3, para os quais foram registradas a menor (18,93N/cm²) e a maior (28,77N/cm²) tensões máximas, respectivamente (ver Quadro 22), na Equação (2) tem-se:

$$R_{ud} = \left[18,93 - \frac{28,77 - 18,93}{2} \times 1,5 \right] \times \frac{1}{2,0} \leq (1 - 0,2 \times 1,5) \times 18,93 \times \frac{1}{2,0} \quad (3)$$

$$R_{ud} = 5,775N/cm^2 \leq 6,625N/cm^2 \quad (3)$$

Assim, a partir da Equação (2) chega-se aos dois valores explicitados na Equação (3), 5,775N/cm² (0,05MPa) e 6,625N/cm² (0,06MPa), dos quais adota-se o mais restritivo como resistência admitida de projeto. Com isso, tem-se que num possível uso do painel desenvolvido nesta pesquisa para a construção de uma edificação, os cálculos estruturais devem ser feitos de modo que a tensão de compressão máxima aplicada seja igual a 5,775N/cm².

7.11.2 Estado-limite de serviço

A NBR 15575-2 determina que para ser calculada a resistência à compressão característica do sistema construtivo no estado limite de serviço, com o seu valor já minorado, deve-se aplicar a Equação (4).

$$R_{sd} = \left[R_{s1} - \frac{R_{s3} - R_{s1}}{2} \times \varepsilon \right] \leq (1 - 0,2 \times \varepsilon) \times R_{s1} \quad (4)$$

Onde:

R_{sd} = resistência no estado limite de serviço admitida de projeto;

R_{s1} = resistência última na fase elástica do protótipo que suportou a menor carga;

R_{s3} = resistência última na fase elástica do protótipo que suportou a maior carga;

y_m = coeficiente de ponderação da resistência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003);

ε = coeficiente de minoração = $[(1 + *sA) \times (1 + *sB) \times (1 + *sC) \dots]$, sendo $*sA$, $*sB$ e $*sC$, iguais aos coeficientes de variação da resistência dos materiais A, B e C, respectivamente, correlativa a R_{sd} . Os materiais A, B, C e outros, devem constituir e reger, de forma majoritária, o comportamento mecânico do componente em análise na composição da resistência R_{ud} . Entretanto, a NBR 15575-2 coloca que, no caso de edificações térreas, não sendo possível

realizar, por motivos técnicos ou de viabilidade econômica, o controle sistemático dos materiais A, B, C e outros, permite-se prescindir da obtenção estatística de σ_A , σ_B e σ_C , desde que se adote $\epsilon = 1,5$.

No caso do painel desenvolvido, os materiais que o compõem vão de A a E, sendo eles o compósito termoplástico, a barra rosqueada, a porca, a arruela e o parafuso. Entretanto, como não há dados sobre os coeficientes de variação da resistência de tais materiais em relação ao esforço de compressão, para o cálculo da resistência à compressão no estado-limite de serviço característica de projeto do sistema construtivo, foi considerado $\epsilon = 1,5$. Aplicando-se os valores máximos de tensão suportados pelos protótipos CP 1 e CP 3 na fase elástica, para os quais foram registradas a menor ($13,63\text{N/cm}^2$) e a maior ($14,39\text{N/cm}^2$) tensões máximas, respectivamente (ver Quadro 22), na Equação (4) tem-se:

$$R_{sd} = \left[13,63 - \frac{14,39 - 13,63}{2} \times 1,5 \right] \leq (1 - 0,2 \times 1,5) \times 13,63 \quad (5)$$

$$R_{sd} = 13,06\text{N/cm}^2 \leq 9,541\text{N/cm}^2 \quad (5)$$

Assim, a partir da Equação (4) chega-se aos dois valores explicitados na Equação (5), $13,06\text{N/cm}^2$ ($0,13\text{MPa}$) e $9,541\text{N/cm}^2$ ($0,09\text{MPa}$), dos quais adota-se o mais restritivo como a resistência admitida de projeto. Com isso, tem-se que num possível uso do painel desenvolvido nesta pesquisa para a construção de uma edificação, os cálculos estruturais devem ser feitos de modo que a resistência no estado limite de serviço admitida de projeto seja, no máximo, $9,541\text{N/cm}^2$.

7.11.3 Comentários sobre as resistências à compressão calculadas

Numa situação real, o cálculo estrutural de uma edificação que utilizaria os painéis de vedação projetados deve tomar como valor de referência a resistência no estado-limite mais restritivo. No caso do sistema construtivo desenvolvido, a resistência à compressão no estado-limite último é mais restritiva que a do estado-limite de serviço. Isso ocorreu em função dos coeficientes de segurança “ ϵ ” e “ γ_m ” existentes no cálculo da resistência no estado-limite último, conforme Equação (2), devido à grande diferença nas tensões máximas suportadas pelos CP 1 e CP 3, $18,93\text{N/cm}^2$ e $28,77\text{N/cm}^2$, respectivamente, o que diminuiu a resistência característica do painel no estado-limite último, e devido à quase inexistente diferença entre as cargas máximas suportadas pelos CP 1 e CP 3 na fase elástica, $13,63\text{N/cm}^2$ e $14,39\text{N/cm}^2$, respectivamente, o que aumentou a resistência característica do painel no estado-limite de serviço.

Deve ser ressaltado que os 3 protótipos utilizados no ensaio de resistência à compressão foram os mesmos utilizados nos ensaios de resistência ao impacto de corpo duro e corpo mole. Com isso, danos sofridos por eles nestes ensaios, principalmente no de corpo mole, influenciaram decisivamente o desempenho do sistema no ensaio de resistência à compressão. Por exemplo, o CP 1 teve seu rompimento caracterizado pela projeção para a frente de suas peças superiores. Tal projeção ocorreu primeiramente no ensaio de resistência ao impacto de corpo mole (ver item 7.3), sendo posteriormente amenizada com a fixação das chapas de aço nos montantes (ver item 7.5). Porém, o protótipo não voltou à sua condição original, ou seja, aquela anterior à execução do ensaio de resistência ao impacto de corpo mole. Por isso, antes do início do ensaio de resistência à compressão, já havia a tendência das peças superiores do CP 1 serem projetadas para a frente novamente com a carga aplicada durante o ensaio, o que de fato ocorreu. Finalmente, a resistência máxima do CP 1 no ensaio foi a que se utilizou nos cálculos da resistência no estado-limite último, e que provavelmente seria superior caso o protótipo não estivesse danificado pelos ensaios anteriores. Por outro lado, como a quantidade de material adquirida era suficiente apenas para a confecção de 3 protótipos, o emprego destes nos 3 ensaios teve de ser feito. Por sua vez, durante a execução do ensaio de resistência à compressão com o CP 2 houve um problema com a câmera fotográfica que filmava o relógio comparador responsável por medir os deslocamentos verticais do painel e, por consequência, os dados adquiridos durante o ensaio foram perdidos. Com isso as áreas danificadas do painel durante este ensaio foram consertadas e o ensaio foi refeito. Porém, como dito anteriormente, o protótipo não voltou à sua condição original, tendo um desempenho inferior na reexecução do ensaio quando comparado ao feito inicialmente. Como exemplo, a tensão máxima suportada pelo CP 2 registrada no ensaio feito inicialmente foi cerca de 30,38N/cm², contra 21,20N/cm² na reexecução.

Nesse sentido, supondo que a menor tensão máxima suportada pelos protótipos foi 28,77N/cm² (tensão registrada para o CP 3), a maior tensão máxima foi 30,38N/cm² (tensão suportada pelo CP 2, mas descartada por falha no ensaio) e que a tensão máxima registrada para o terceiro protótipo está no intervalo dos valores citados, a resistência no estado limite último admitida de projeto segundo a Equação (2) seria 10,633N/cm², conforme apresentado na Equação (6), ou seja, quase o dobro da que será tomada como característica para o painel (5,775N/cm²).

$$R_{ud} = \left[30,38 - \frac{30,38 - 28,77}{2} \times 1,5 \right] \times \frac{1}{2,0} \leq (1 - 0,2 \times 1,5) \times 30,38 \times \frac{1}{2,0} \quad (6)$$

$$R_{sd} = 14,587N/cm^2 \leq 10,633N/cm^2 \quad (6)$$

Tendo em vista que a carga máxima suportada pelos protótipos na fase elástica foi muito parecida, é provável que sendo refeitos os testes com painéis novos, a resistência característica no estado-limite de serviço fique próximo da calculada, ou seja, $9,541\text{N/cm}^2$ ($0,09\text{MPa}$), inferior aos $10,633\text{N/cm}^2$ ($0,1\text{MPa}$) supostos. Neste caso, os painéis seriam calculados segundo o estado de limite de serviço, mais restritivo.

Além da tensão suportada e dos deslocamentos verticais sofridos, outra variável igualmente importante a ser considerada na adoção dos painéis numa situação real é o deslocamento horizontal, ou flambagem. O Quadro 22 mostra que para tensões próximas às máximas calculadas a partir das Equações (2) e (4) e explicitadas na Equações (3) e (5), respectivamente, $5,775\text{N/cm}^2$ e $9,541\text{N/cm}^2$, os deslocamentos horizontais registrados para os protótipos foram os mostrados no Quadro 23.

Quadro 23: Tensões calculadas x Tensões registradas x Deslocamentos horizontais.

Tensões calculadas a partir das Equações (2) e (4)	Tensões registradas nos ensaios mais próximas às calculadas a partir das Equações (2) e (4)	Deslocamentos horizontais registrados nos ensaios (mm)	
		CP1	CP 3
$5,775\text{N/cm}^2$ ($0,057\text{MPa}$)	$6,06\text{N/cm}^2$ ($0,060\text{MPa}$)	5,20	4,34
$9,541\text{N/cm}^2$ ($0,095\text{MPa}$)	$9,09\text{N/cm}^2$ ($0,090\text{MPa}$)	8,07	6,00

Assim, para a tensão mais restritiva de cálculo ($5,775\text{N/cm}^2$), o deslocamento horizontal será cerca de 4mm a 5mm. Se for considerado que o desempenho do sistema à compressão provavelmente seria melhor se os protótipos não estivessem danificados, o valor dos deslocamentos horizontais para essa tensão possivelmente seria menor. Todavia, com uma melhora do desempenho do sistema à compressão, as tensões calculadas a partir das Equações (2) e (4) seriam maiores, o que acarretaria num maior deslocamento horizontal. De modo semelhante aos deslocamentos verticais, os deslocamentos horizontais também devem ser limitados de forma a não causar desconforto psicológico nos usuários do edifício e problemas no uso de esquadrias e equipamentos. Com isso, considera-se que uma flecha de 4mm a 5mm num painel de 2600mm de altura é insuficiente para acarretar problemas (psicológicos e de cunho prático) aos usuários de uma edificação.

8 DISCUSSÃO E PROPOSTA DE MELHORIAS NO PAINEL

A seguir são discutidos a fase de preparação das peças e de montagem dos painéis, as características finais dos protótipos e os resultados dos ensaios mecânicos.

8.1 Preparação das peças e montagem dos painéis de vedação

Como relatado no item 5.1.1, após o corte das peças 2,1cm x 20,0cm x 200,0cm para a obtenção de peças 2,1cm x 20,0cm x 100,0cm, ocorreram diferenças de alguns milímetros no comprimento de algumas delas em relação às outras. Com isso, enquanto uma media 99,5cm, outra media 100,5cm, por exemplo. Apesar dessa falha não ter representado problema para a continuidade do trabalho e, provavelmente, também não representar para uma situação real, caso em que seriam utilizados os mata-juntas, ela é de fácil resolução. Uma marcação mais precisa da linha de corte somada à uma execução também mais precisa no maquinário de corte pode reduzir as diferenças no comprimento das peças para cerca de 2mm ou 3mm.

Já na fase de montagem dos painéis (ver item 5.2.3), os problemas enfrentados estão relacionados ao peso dos protótipos conforme as peças eram conectadas umas às outras e formavam elementos maiores, até, por fim, formar todo o painel. Pronto, ele possui massa aproximada igual a 152kg, sendo apropriado que seu deslocamento seja feito por 2 ou 3 pessoas, além de ser necessário usar equipamentos como talhas. Porém, deve ser considerado que o deslocamento de painéis prontos foi e seria novamente necessário somente para o teste do sistema, já que eles foram desenvolvidos para serem montados no local onde permanecerão após concluída a obra, conforme projeto arquitetônico e estrutural e de acordo com as etapas de montagem apresentadas no item 4.2.1, e não para chegarem prontos ao local de construção. Tendo isso em vista, uma única pessoa é capaz de realizar os deslocamentos das peças e a montagem dos painéis numa situação real.

8.2 Massa/m² vedado e volume/m² vedado

Como abordado na Introdução (item 1) e na Revisão Bibliográfica (item 3), sistemas construtivos que se pretende empregar em ilhas oceânicas devem ser leves e de fácil transporte e manuseio, alguns motivos pelos quais a madeira foi amplamente adotada nas estações científicas.

Nesse sentido, assim como os compósitos termoplásticos foram comparados à madeira no que tange a durabilidade e a manutenibilidade a fim de se obter informações iniciais sobre a

possibilidade de seu uso em ilhas oceânicas, também devem ser comparados em relação à facilidade de transporte. Assim, tendo em vista que ambos os materiais podem ser produzidos com dimensões e formatos que se adéquem à cada situação, dois dos principais pontos a serem analisados são a massa/m² vedado e o volume/m² vedado dos sistemas construtivos. Essas relações indicam, respectivamente, a massa e o volume de material necessários para se executar 1,0m² de vedação utilizando um determinado sistema construtivo. O Quadro 24 apresenta a relação entre essas características para o sistema viga-laje duplo em compósito termoplástico e para o sistema viga-laje em madeira, sistemas cujos conceitos estruturais e mecânicos são semelhantes. Para o caso do sistema viga-laje em madeira, a espécie de madeira considerada foi a utilizada nas vedações da ECASPSP, a *Cariniana micrantha* (GUMZ, 2008), conhecida como Castanha-de-macaco, cuja densidade varia de 550kg/m³ a 600kg/m³ (REDE DE SEMENTES DA AMAZÔNIA, 2007). Além disso, as vedações da ECASPSP são formadas por peças sólidas com 4cm de espessura (GUMZ, 2008).

Quadro 24: Massa/m² vedado e volume/m² vedado das vedações do sistema viga-laje em madeira e das vedações do sistema viga-laje duplo em compósito termoplástico.

Viga-laje em madeira (vedações)			Viga-laje duplo em compósito termoplástico		
Descrição			Descrição		
Parede simples formada por peças sólidas com 4,0cm de espessura.			Parede dupla com paredes externa e interna com 2,1cm de espessura e ligadas por montantes.		
Densidade da madeira	Massa/m ²	Volume/m ²	Densidade do compósito termoplástico	Massa/m ²	Volume/m ²
550kg/m ³ a 600kg/m ³ Média = 575kg/m ³	0,04m x 1,0m x 1,0m x 1,0m x 1,0m = 575kg/m ³ = 23kg/m ²	0,04m x 1,0m x 1,0m = 0,04m ³ /m ²	1246kg/m ³	Massa do painel/altura do painel 151,975kg/2,6m ² = 58,451kg/m ²	0,021m x 1,0m x 1,0m (x2) (paredes externa e interna) + 0,021m x 0,10m x 1,0m (x2) (montantes) = 0,0462m ³ /m ²

O Quadro 24 mostra que a massa por metro quadrado vedado das vedações do sistema viga-laje em madeira é igual a 23kg/m², enquanto as vedações do sistema viga-laje duplo em compósito termoplástico possuem massa/m² vedado igual a 58,451kg/m², ou seja, cerca de 2,5 vezes maior que o primeiro. Isso significa que para se construir as vedações verticais duma determinada edificação, a massa dos materiais empregados em todas elas será 2,5 vezes maior utilizando-se o sistema viga-laje duplo em compósito termoplástico em comparação com o sistema viga-laje em madeira.

Já em relação ao volume/m² vedado dos sistemas, o do sistema em madeira é 0,04m³/m², isto é, utiliza-se 0,04m³ de madeira para que, adotando-se o sistema viga-laje com peças de 4,0cm de espessura, consiga-se executar 1,0m² de vedação. Por sua vez, o volume/m² vedado do sistema em compósito termoplástico é 0,0462m³/m², 15,5% superior ao primeiro.

Ressalta-se que uma massa/m² vedado maior para o primeiro sistema em relação ao segundo já era esperada, uma vez que, como explicado no item 3.3.3, a densidade dos compósitos termoplásticos tende a ser muito maior que a da madeira. Entretanto, um esperado melhor desempenho quanto à durabilidade e à manutenibilidade daqueles em relação à esta motiva a adoção dos compósitos em ilhas oceânicas.

8.3 Desempenho nos ensaios mecânicos

Baseando-se nos resultados dos ensaios mecânicos dos painéis podem ser propostas melhorias a fim de que se cumpra todas as exigências das NBR 15575-2 e NBR 15575-4 em relação aos ensaios realizados.

8.3.1 Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro

Como os protótipos apresentaram desempenho “Intermediário” no ensaio de resistência ao impacto de corpo duro, sendo que a NBR 15575-4 não apresenta os requisitos para que se alcance o nível “Superior” (ver itens 7.1, 7.2, 7.6 e 7.7), considerou-se não haver necessidade de modificação do painel frente a este critério.

8.3.2 Ensaio de resistência ao impacto de corpo mole

Quanto ao ensaio de resistência ao impacto de corpo mole, a conexão das 2 peças que formam os montantes por meio das chapas de aço, visando simular uma situação de peça contínua, melhorou substancialmente os resultados dos protótipos frente às exigências das NBRs (ver itens 7.3, 7.4, 7.8 e 7.9). Assim, caso não seja possível a adoção de uma peça única como montante, a fixação das chapas metálicas deve ser feita na face interna dos montantes, simultaneamente à etapa de ligação dos painéis colineares (ver item 4.2.1.2). Essa solução, apresentada no item 7.5, difere da que foi feita durante os ensaios. Neste caso, como os ensaios abrangeram apenas 1 painel por vez, as chapas metálicas foram fixadas na face externa dos montantes já que não causariam problemas e devido à facilidade de fixação. Contudo, tal modificação não foi suficiente para que os protótipos mostrassem deslocamentos horizontais instantâneos máximos dentro dos limites especificados em norma, apesar do sistema ter

cumprido todos os outros requisitos para o alcance do desempenho “Mínimo” no ensaio. Com isso, há a necessidade de algumas melhorias no painel.

Nesse sentido, uma vez que os dois montantes existentes somados às chapas de aço não foram o bastante para limitar tais deslocamentos, propõe-se a inserção de 1 montante localizado no centro do painel. Porém, deve-se ter em vista que a redução necessária no deslocamento horizontal instantâneo é de cerca de 50%, uma vez que os deslocamentos registrados foram 42mm e 40mm para os protótipos CP 2 e CP 3, nesta ordem, e o exigido em norma é 20,8mm (ver item 7.9). No entanto, a constatação da eficiência de tal medida somente poderá ser confirmada por meio de novos ensaios.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a massa e o peso do painel. Com a inserção de mais um montante a massa do painel passa para 158,379kg e o seu peso para 1553,167N, o que significa 597,372N/m². Como o peso/m² para um sistema ser considerado leve pelas NBR 15575-2 e NBR 15575-4 é 600N/m² e, por isso, poder apresentar deslocamentos horizontais instantâneos iguais ao dobro daqueles que não são considerados como tal, qualquer outra peça acrescida pode fazer com que o peso do painel ultrapasse os 600N/m², tornando necessário que seus deslocamentos horizontais instantâneos no ensaio de resistência ao impacto de corpo mole sejam menores que 10,4mm (ver item 7.4).

Por último, o uso de montantes com 2,60m de altura, ou seja, sem emendas, como comentado anteriormente, além de não alterar o peso dos painéis, provavelmente resultará num deslocamento horizontal instantâneo menor que aquele registrado para os painéis com emendas feitas com as chapas de aço. Essa solução somada a adição de um montante central pode ser suficiente para que os deslocamentos se enquadrem no exigido em norma.

8.3.3 Ensaio de resistência à compressão

Com relação à resistência à compressão, caso os protótipos utilizados neste tipo de ensaio não estivessem danificados, as resistências admitidas de projeto calculadas provavelmente seriam muito superiores, como relatado no item 7.11.3. Mesmo assim, a resistência à compressão calculada mais restritiva, isto é, 5,775N/cm², indica que o número de painéis que formam um cômodo quadrado de 9,0m², ou seja, 12 (3 em cada lado), é capaz de suportar uma carga distribuída, como a de uma cobertura, igual a 10934N/m² (~11kN/m²).

Também pode-se simular uma situação menos favorável, como um cômodo 6,0m x 4,0m. Neste caso, seriam 20 painéis formando o cômodo. Os 20 seriam capazes de suportar uma carga

distribuída de cobertura igual a 6833N/m^2 ($6,8\text{kN/m}^2$). Considerando uma cobertura formada por madeiramento (caibros e ripas) e telhas termoacústicas compostas por chapas de aço com $0,65\text{mm}$ de espessura e camada de isolamento de poliuretano com 30mm de espessura (tipo de telha semelhante à utilizada na ECASPSP e na Estação Científica do Atol das Rocas) cujas cargas/ m^2 são iguais a $12,0\text{kg/m}^2$ (FILHO, 1954) e $13,64\text{kg/m}^2$ (TUPER, 2015), respectivamente, o que significa uma tensão de $0,011\text{N/cm}^2$ e $0,013\text{N/cm}^2$, nesta ordem, e enquadrando tal cobertura na categoria “Terraços sem acesso ao público” da NBR 6120, que trata das cargas para o cálculo de estruturas de edificações e que determina $0,2\text{N/cm}^2$ como sendo a carga accidental para esse tipo de espaço (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980), chega-se a uma tensão total gerada pela cobertura igual a $0,224\text{N/cm}^2$ ($0,011\text{N/cm}^2 + 0,013\text{N/cm}^2 + 0,2\text{N/cm}^2$) o que equivale a 2240N/m^2 . Essa carga/ m^2 distribuída nos 24m^2 do cômodo e aplicada sobre os 20 painéis (que possuem 1420cm^2 de seção transversal bruta) gera uma tensão sobre eles igual a $1,89\text{N/cm}^2$ ($\sim 0,19\text{MPa}$).

Assim, mesmo considerando a situação simulada mais desfavorável, o cômodo $6,0\text{m} \times 4,0\text{m}$, e que ainda sejam utilizadas tesouras de madeira na cobertura e adotados coeficientes de majoração das cargas, pensa-se que a resistência admitida de projeto do painel será suficiente para suportá-las. Quanto aos deslocamentos horizontais, conforme explicado no item 7.11.3, para a carga de cálculo mais restritiva ($5,775\text{N/cm}^2$) o deslocamento estaria apenas entre 4mm e 5mm . Considerando que os painéis serão utilizados em edificações térreas, na qual haverá somente a cobertura sobre eles, e adotando-se o cômodo $6,0\text{m} \times 4,0\text{m}$ e a cobertura citada anteriormente, a tensão aplicada seria igual a $1,89\text{N/cm}^2$ e, conseqüentemente, os deslocamentos seriam inferiores aos 4mm e 5mm colocados.

Tendo em vista todo o exposto, considerou-se não haver necessidade de modificação do painel estrutural de vedação frente a este critério. Entretanto, a adoção de montantes únicos (sem emendas) somada à inserção de um montante central provavelmente melhorará também seu desempenho no ensaio de resistência à compressão.

A seguir são feitas as considerações finais sobre o trabalho.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando-se os resultados dos ensaios mecânicos e a discussão sobre eles e sobre as características do painel com o objetivo geral e com os objetivos específicos traçados neste trabalho, conclui-se que esses foram alcançados. Entretanto, a hipótese levantada não foi comprovada, uma vez que o sistema construtivo desenvolvido foi capaz de cumprir todas as exigências das NBR 15575-2 e NBR 15575-4 referentes aos ensaios de resistência ao impacto de corpo duro e de resistência à compressão, mas dentre todas as exigências referentes ao ensaio de resistência ao impacto de corpo mole, a que limita os deslocamentos horizontais instantâneos não foi cumprida. Nesse sentido, para que o painel melhore o seu desempenho mecânico, recomenda-se a inserção de um montante central e o uso de montantes inteiriços (sem emendas) ou, caso não seja possível, que as junções entre as peças sejam feitas com chapas de aço inoxidável.

Assim, acredita-se que o painel estrutural de vedação apresenta real possibilidade de utilização em estações científicas em ilhas oceânicas, ou mesmo em edificações térreas em áreas isoladas e sob forte ação das intempéries, uma vez que seus componentes foram projetados para serem simples e leves – a maioria das peças do painel possui apenas 5,2kg, sendo estas, além disso, as de maior massa –, sua montagem foi pensada para ser realizada com rapidez e por apenas uma pessoa – o autor deste trabalho levou cerca de 4,5h para montar cada protótipo –, e os aprimoramentos citados podem ser suficientes para fazê-lo apresentar o desempenho “Mínimo” requerido no ensaio de resistência ao impacto de corpo mole.

Com a realização de modificações que diminuam os deslocamentos horizontais instantâneos e tendo-se em vista que a resistência à compressão admitida de projeto do painel pode ser muito superior aos $5,775\text{N/cm}^2$ ($0,05\text{MPa}$) calculados, visto que os protótipos utilizados neste ensaio já estavam danificados devido aos ensaios anteriores, pode-se ainda cogitar a possibilidade de empregar os painéis estruturais de vedação na construção de edificações com dois pavimentos. Para tanto, é importante a realização de pesquisas que obtenham dados a respeito do comportamento mecânico do painel construído já com três montantes inteiriços (ou com características que simulem uma configuração similar), dando ênfase aos ensaios de resistência ao impacto de corpo mole e de resistência à compressão.

Por fim, também são necessários trabalhos que estudem o comportamento do painel frente aos demais ensaios relacionados à segurança estrutural listados pelas NBR 15575-2 e NBR 15575-4.

10 REFERÊNCIAS

- ADHIKARY, K. B.; PANG, S.; STAIGER, M. P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). **Composites Part B: Engineering**, v. 39, n. 5, p. 807–815, jul. 2008a.
- ADHIKARY, K. B.; PANG, S.; STAIGER, M. P. Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with *Pinus radiata* sawdust. **Chemical Engineering Journal**, v. 142, n. 2, p. 190–198, ago. 2008b.
- ADHIKARY, K. B.; PARK, C. B.; ISLAM, M. R.; RIZVI, G. M. Effects of lubricant content on extrusion processing and mechanical properties of wood flour-high-density polyethylene composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 24, n. 2, p. 155–171, 2011.
- ADVANCED MANUFACTURING OFFICE. **Fiber-reinforced polymer composites: pursuing the promise**. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2014.
- AGUNSOYE, J. O.; AIGBODION, V. S. Bagasse filled recycled polyethylene bio-composites: morphological and mechanical properties study. **Results in Physics**, v. 3, p. 187–194, 2013.
- ALMAADEED, M. A.; KAHRAMAN, R.; NOORUNNISA KHANAM, P.; MADI, N. Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties. **Materials & Design**, v. 42, p. 289–294, dez. 2012.
- ALVAREZ, C. E. **Metodologia para construção em áreas de difícil acesso e de interesse ambiental**: aplicabilidade na Antártica e nas ilhas oceânicas brasileiras. 2003. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- ALVAREZ, C. E.; MELO, J. E.; MELLO, R. L. As trilhas terrestres do PARNAMAR de Fernando de Noronha: uma questão de coerência e identidade com o meio ambiente. In: VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, São Carlos. **Anais...** São Carlos: 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D7032**: standard specification for establishing performance ratings for wood-plastic composite deck boards and guardrail systems (guards or handrails). 2010. ASTM International, West Conshohocken, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D883**: standard terminology relating to plastics. 2012. ASTM International, West Conshohocken, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D7568**: standard specification for polyethylene-based structural-grade plastic lumber for outdoor applications. 2013a. ASTM International, West Conshohocken, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6662**: standard specification for polyolefin-based plastic lumber decking boards. 2013b. ASTM International, West Conshohocken, 2013.
- ASHORI, A.; NOURBAKHS, A. Characteristics of wood-fiber plastic composites made of recycled materials. **Waste Management**, v. 29, n. 4, p. 1291–1295, abr. 2009.

ASHORI, A.; SHESHMANI, S. Hybrid composites made from recycled materials: moisture absorption and thickness swelling behavior. **Bioresource technology**, v. 101, n. 12, p. 4717–4720, jun. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. 1980. ABNT, Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11675**: divisórias leves internas moduladas - verificação da resistência a impactos. 1990. ABNT, Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. 1997. ABNT, Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas - procedimento. 2003. ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2**: edificações habitacionais - desempenho - parte 2: requisitos para os sistemas estruturais. 2013a. ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: edificações habitacionais - desempenho - parte 4: sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. 2013b. ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais - desempenho - parte 1: requisitos gerais. 2013c. ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

ASUKE, F.; AIGBODION, V. S.; ABDULWAHAB, M.; FAYOMI, O. S. I.; POPOOLA, A. P. I.; NWOYI, C. I.; GARBA, B. Effects of bone particle on the properties and microstructure of polypropylene/bone ash particulate composites. **Results in Physics**, v. 2, p. 135–141, 2012.

AYRILMIS, N.; AKBULUT, T.; DUNDAR, T.; WHITE, R. H.; MENGELOGLU, F.; BUYUKSARI, U.; CANDAN, Z.; AVCI, E. Effect of boron and phosphate compounds on physical, mechanical, and fire properties of wood-polypropylene composites. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 63–69, 2012.

AZWA, Z. N.; YOUSIF, B. F.; MANALO, A. C.; KARUNASENA, W. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. **Materials & Design**, v. 47, n. 5, p. 424–442, maio 2013.

BAYER, D. R. **Relatório técnico**. Novo Hamburgo: Feevale, 2012.

BEDFORD TECHNOLOGY. **SelectForce and FiberForce HDPE plastic lumber products technical manual for decking/boardwalk/platform applications**. Disponível em: <[http://www.plasticboards.com/up/SelectForce & FiberForce Technical Manual\(3\).pdf](http://www.plasticboards.com/up/SelectForce & FiberForce Technical Manual(3).pdf)>. Acesso em: 24 mar. 2015.

BEG, M. D. H.; PICKERING, K. L. Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part I: Effects on physical and mechanical properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 7, p. 1091–1100, jul. 2008.

BENTHIEN, J. T.; THOEMEN, H. Effects of raw materials and process parameters on the physical and mechanical properties of flat pressed WPC panels. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, p. 570–576, 2012.

BLEDZKI, A. K.; LETMAN, M.; VIKSNE, A.; RENCE, L. A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 36, p. 789–797, 2005.

BLEDZKI, A. K.; LETMAN-SAKIEWICZ, M.; MURR, M. Influence of static and cyclic climate condition on bending properties of wood plastic composites (WPC). **Express Polymer Letters**, v. 4, n. 6, p. 364–372, 2010.

BRAUN INTERTEC CORPORATION. **Plastic lumber engineering data**. Disponível em: <<http://rescoplastics.com/engineering-and-testing>>. Acesso em: 24 mar. 2015.

BUTYLINA, S.; HYVÄRINEN, M.; KÄRKI, T. Accelerated weathering of wood–polypropylene composites containing minerals. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 11, p. 2087–2094, nov. 2012.

BUYUKSARI, U.; AYRILMIS, N.; AKBULUT, T. Compression wood as a source of reinforcing filler for thermoplastic composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 123, p. 1740–1745, 2012.

CALKINS, M. **Materials for sustainable sites: a complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable construction materials**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

CARROLL, D. R.; STONE, R. B.; SIRIGNANO, A. M.; SAINDON, R. M.; GOSE, S. C.; FRIEDMAN, M. A. Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 31, n. 3, p. 241–251, mar. 2001.

CHAVOOSHI, A.; MADHOUSHI, M.; NAVI, M.; ABARESHI, M. Y. MDF dust/PP composites reinforced with nanoclay: Morphology, long-term physical properties and withdrawal strength of fasteners in dry and saturated conditions. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 324–330, 2014.

CHEVALI, V. S.; DEAN, D. R.; JANOWSKI, G. M. Effect of environmental weathering on flexural creep behavior of long fiber-reinforced thermoplastic composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 12, p. 2628–2640, dez. 2010.

CHOW, C. P. L.; XING, X. S.; LI, R. K. Y. Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, v. 67, n. 2, p. 306–313, fev. 2007.

CORROLLER, P. Le; FAVIS, B. D. Droplet-in-droplet polymer blend microstructures: a potential route toward the recycling of co-mingled plastics. **Macromolecular Chemistry and Physics**, v. 213, p. 2062–2074, 2012.

DIAS, B. Z.; CRUZ, D. O.; ALVAREZ, C. E. **Laudo de habitabilidade da Estação Científica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo**. Laboratório de Planejamento e Projetos, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

DIAS, B. Z.; FUKAI, F. M.; DORIO, N.; ALVAREZ, C. E. Concreto-PVC, madeira serrada e madeira plástica: estudo comparativo de adequabilidade para construções em ilhas oceânicas. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Guimarães. **Anais...** Guimarães: Universidade do Minho, 2014.

ECOBLOCK. **Sugestões para instalação do ecoblock:** guia do instalador. Vale do Jatobá: Ecoblock, 2014. Disponível em: <<http://www.ecoblock.ind.br/attachments/article/29/Guia%20do%20Instalador%20Ecoblock%202015.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2014.

ECO-TECH PLASTICS. **Duramax structural lumber.** Disponível em: <http://www.eco-techplastics.com/uploads/Eco-Tech_DuraMax.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2015a.

ECO-TECH PLASTICS. **Expansion/contraction characteristics.** Disponível em: <<http://www.eco-techplastics.com/uploads/CHARACTERISTICS.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2015b.

EKOPLUS. **Instruções de instalação do deck em régua - WPC - Ekoplus.** Disponível em: <http://www.ekoplus.com.br/deck-wpc/etapas_de_instalacao_do_deck_em_regua.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2015.

ENGLUND, K.; VILLECHEVROLLE, V. Flexure and water sorption properties of wood thermoplastic composites made with polymer blends. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 120, n. 7, p. 1034–1039, 2011.

FABIYI, J. S.; MCDONALD, A. G. Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 41, n. 10, p. 1434–1440, out. 2010.

FILHO, J. M. Considerações sobre telhados de edifícios. p. 223–250, 1954.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook:** wood as an engineering material. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1999.

GARCÍA, M.; HIDALGO, J.; GARMENDIA, I.; GARCÍA-JACA, J. Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 11, p. 1772–1776, nov. 2009.

GREEN BAY DECKING. **GeoDeck technical data:** GeoDeck composite decking and railing system. Disponível em: <http://www.greenbaydecking.com/wp-content/uploads/2013/08/Detailed_Technical_Data_Sheet.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2015a.

GREEN BAY DECKING. **GeoDeck mechanical properties reference sheet.** Disponível em: <http://www.greenbaydecking.com/wp-content/uploads/2013/08/Mechanical_Properties_Reference_Sheet.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2015b.

GUMZ, E. M. P. **Quando o canteiro de obras é uma ilha oceânica:** a nova estação científica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

HEMMATI, F.; GARMABI, H. A study on fire retardancy and durability performance of bagasse fiber/polypropylene composite for outdoor applications. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 26, n. 8, p. 1041–1056, 2012.

HONG, H.; LIAO, H.; ZHANG, H.; HE, H.; LIU, T.; JIA, D. Significant improvement in performance of recycled polyethylene/wood flour composites by synergistic compatibilization at multi-scale interfaces. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 64, p. 90–98, 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: IPT, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: IPT, 2013.

KIM, S.-J.; MOON, J.-B.; KIM, G.-H.; HA, C.-S. Mechanical properties of polypropylene/natural fiber composites: comparison of wood fiber and cotton fiber. **Polymer Testing**, v. 27, n. 7, p. 801–806, out. 2008.

KIZILTAS, A.; GARDNER, D. J.; HAN, Y.; YANG, H.-S. Mechanical properties of microcrystalline cellulose (MCC) filled engineering thermoplastic composites. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 22, n. 3, p. 365–372, 2014.

KLYOSOV, A. A. **Wood-plastic composites**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

KUO, P.-Y.; WANG, S.-Y.; CHEN, J.-H.; HSUEH, H.-C.; TSAI, M.-J. Effects of material compositions on the mechanical properties of wood–plastic composites manufactured by injection molding. **Materials & Design**, v. 30, n. 9, p. 3489–3496, out. 2009.

LEGAL COMPLIANCE DEPARTMENT. **Material safety data sheet**. Disponível em: <<http://www.latitudesdeck.com/~media/Latitudes/literature/latitudesdeckmsds-266.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

LEI, Y.; WU, Q.; YAO, F.; XU, Y. Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 7, p. 1664–1674, jul. 2007.

LEU, S.-Y.; YANG, T.-H.; LO, S.-F.; YANG, T.-H. Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood–plastic composites (WPCs). **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 120–127, abr. 2012.

MASTER MARK PLASTICS INC. **Material safety data sheet**. Disponível em: <http://www.rhino-deck.com/files/6013/6124/3001/Rhino_Deck_MSDS_Oct_2011.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2015.

MASTER MARK PLASTICS INC. **Technical information: physical and mechanical properties**. Disponível em: <<http://www.rhino-deck.com/main-nav/technical-information/>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

MIGNEAULT, S.; KOUBAA, A.; ERCHIQUI, F.; CHAALA, A.; ENGLUND, K.; WOLCOTT, M. P. Effects of processing method and fiber size on the structure and properties

of wood-plastic composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 1, p. 80–85, 2009.

MOHR, L. V.; CASTRO, J. W. A.; COSTA, P. M. S.; ALVES, R. J. V. **Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo - Volume II**. Brasília: MMA/Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2009.

MORRELL, J. J.; STARK, N. M.; PENDLETON, D. E.; MCDONALD, A. G. Durability of wood-plastic composites. In: Tenth International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites and Cellulose Nanocomposites Symposium, Madison. **Anais...** Madison: Forest Products Society, 2010.

NAJAFI, S. K. Use of recycled plastics in wood plastic composites - a review. **Waste Management**, v. 33, n. 9, p. 1898–1905, set. 2013.

NAJAFI, S. K.; HAMIDINA, E.; TAJVIDI, M. Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 100, n. 5, p. 3641–3645, 5 jun. 2006.

NAJAFI, S. K.; KIAEFAR, A.; HAMIDINA, E.; TAJVIDI, M. Water absorption behavior of composites from sawdust and recycled plastics. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 26, n. 3, p. 341–348, 1 fev. 2007.

NAJAFI, S. K.; KORDKHEILI, H. Y. Effect of sea water on water absorption and flexural properties of wood-polypropylene composites. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 4, p. 553–556, 12 jan. 2011.

NAUMANN, A.; STEPHAN, I.; NOLL, M. Material resistance of weathered wood-plastic composites against fungal decay. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 75, p. 28–35, 2012.

NOURBAKHSI, A.; ASHORI, A. Preparation and properties of wood plastic composites made of recycled high-density polyethylene. **Journal of Composite Materials**, v. 43, n. 8, p. 877–883, 1 abr. 2009.

OZEN, E.; KIZILTAS, A.; KIZILTAS, E. E.; GARDNER, D. J. Natural fiber blend-Nylon 6 composites. **Polymer Composites**, v. 34, p. 544–553, 2013.

PARENTE, R. A.; PINHEIRO, L. M. Plásticos reciclados para elementos estruturais. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 10, n. 47, p. 75–95, 2008.

PLASTEAK INC. **Plastic lumber specifications**. Disponível em: <http://www.plasteak.com/wp-content/pdf/specifications-and-MSDS/PlasTEAK_Recycled_Plastic_Lumber_Specifications_Sheet.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2015.

PLASTICWOOD.IT. **Technical Data Sheet PW Compound 104/3**. Disponível em: <http://plasticwood.it/_ING/images/PDF/ST_104-3_TDS_ENG.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2015.

PLASTRUCT POLYZONE. **Plastic lumber: physical properties**. Disponível em: <<http://www.polyzone.com/about/wp-content/uploads/2014/05/Plastic-Lumber-Tech.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

RAJA, V. L.; KUMARAVEL, A. Studies on physical and mechanical properties of silica fume-filled nylon 66 polymer composites for mechanical components. **Polymers & Polymer Composites**, v. 23, n. 6, p. 427–433, 2015.

REBELLO, Y. C. P. **Bases para projeto estrutural na arquitetura**. 4. ed. São Paulo: Zigurate Editora, 2007.

REDE DE SEMENTES DA AMAZÔNIA. Castanha-de-macaco: cariniana micrantha Ducke. **Informativo técnico Rede de sementes da Amazônia**, v. 15, p. 1–2, 2007.

RODOLFO JR., A.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. **Tecnologia do PVC**. 2. ed. São Paulo: ProEditores / Braskem, 2006.

ROWELL, R. M.; LANGE, S. E.; JACOBSON, R. E. Effects of moisture on aspen-fiber/polypropylene composites. In: *Progress in Woodfibre-Plastic Composites*, Toronto. **Anais...** Toronto: 2002.

SILVA, F. de A.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R. D. Fatigue behavior of sisal fiber reinforced cement composites. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 21-22, p. 5507–5513, ago. 2010.

SINGH, S.; DEEPAK, D.; AGGARWAL, L.; GUPTA, V. K. Tensile and flexural behavior of hemp fiber reinforced virgin-recycled HDPE matrix composites. **Procedia Materials Science**, v. 6, p. 1696–1702, 2014.

STARK, N. M.; MATUANA, L. M. Influence of photostabilizers on wood flour–HDPE composites exposed to xenon-arc radiation with and without water spray. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, n. 12, p. 3048–3056, dez. 2006.

STARK, N. M.; ROWLANDS, R. E. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. **Wood and Fiber Science**, v. 35, n. 2, p. 167–174, 2003.

STRÖMBERG, E.; KARLSSON, S. The effect of biodegradation on surface and bulk property changes of polypropylene, recycled polypropylene and polylactide biocomposites. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 63, n. 8, p. 1045–1053, dez. 2009.

TABKHPAZ SARABI, M.; BEHRAVESH, A. H.; SHAHI, P.; DARYABARI, Y. Effect of polymeric matrix melt flow index in reprocessing extruded wood-plastic composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 27, n. 7, p. 881–894, 2014.

TREX COMPANY. **Physical and mechanical properties for Trex Transcend and Trex Enhance**. Disponível em: <<http://s7d4.scene7.com/is/content/Trex/trex-physical-mechanical-properties-transcend-enhancepdf.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

TUPER. **Catálogo de Soluções para Construção Civil Tuper**. São Bento do Sul: Tuper S.A., 2015. Disponível em: <<http://www.tuper.com.br/media-center/central-de-downloads/?download-category=851>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

UNIVERSAL FOREST PRODUCTS. **Latitudes material properties**. Disponível em: <<http://www.latitudesdeck.com/~media/Latitudes/literature/latitudesmaterialprop.pdf>>.

WEI, L.; MCDONALD, A. G.; FREITAG, C.; MORRELL, J. J. Effects of wood fiber esterification on properties, weatherability and biodurability of wood plastic composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, p. 1348–1361, 2013.

WOELFFEL, A. B. **Avaliação da adequação de sistemas construtivos em madeira na produção de edificações em ilhas oceânicas**: estudos de caso no Atol das Rocas e nos Arquipélagos de Fernando de Noronha e São Pedro e São Paulo. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

WOELFFEL, A. B.; ALVAREZ, C. E. A nova Estação Científica da Reserva Biológica do Atol das Rocas: a adoção de um sistema construtivo tradicional em madeira pré-fabricada aplicada nas condições ambientais e logísticas de um atol. In: V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1, Recife. **Anais...** Recife: 2009.

WOELFFEL, A. B.; ALVAREZ, C. E. **Estação Científica da Ilha da Trindade**: Relatório Técnico de Atividades. Laboratório de Planejamento e Projetos, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

YEMELE, M. C. N.; KOUBAA, A.; CLOUTIER, A.; SOULOUNGANGA, P.; WOLCOTT, M. Effect of bark fiber content and size on the mechanical properties of bark/HDPE composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 41, n. 1, p. 131–137, 2010.